

**Experimentelle Betrachtung visuell räumlicher
Aufmerksamkeit jenseits des Spotlight Modells
mittels funktioneller Magnetresonanztomographie**

Dem Psychologischen Institut der TU Darmstadt zur Erlangung des
akademischen Grades

doctor rerum naturalium
(Dr.rer.nat.)

am 18.04.2005
eingereichte Dissertation,
vorgelegt von

Dipl.-Psych. Daniel Ebeling, geboren in Neustadt an der Weinstraße

Referenten:
Prof. Dr. Rainer Schmidt
Prof. Dr. Reinhard Lechner

Fachbereich 3 Humanwissenschaften
Hochschulkennziffer D 17

Disputation am 24.11.2005

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	4
2	Vorwort	5
3	Grundlagen.....	6
3.1	Experimentalpsychologische Aufmerksamkeitsforschung.....	7
3.1.1	Arbeitsdefinition Aufmerksamkeit	7
3.1.2	„Spotlight“ und „Zoom Lens“ der visuellen Aufmerksamkeit	8
3.1.3	Behaviorale Messung der Aufmerksamkeitsverteilung	10
3.2	Anatomie des visuellen Systems.....	11
3.2.1	Vom Auge zum Kortex	11
3.2.2	Visuelle Areale.....	13
3.2.3	Visuelle Aufmerksamkeit im Gehirn	19
3.3	Einführung in die Magnetresonanztomographie (MRT)	22
3.3.1	MRT in der Forschungspraxis	22
3.3.2	Komponenten eines MRT	24
3.3.3	Physikalische Grundlagen.....	27
3.3.4	Anatomische Bildgebung.....	32
3.3.5	Funktionelle Bildgebung.....	36
3.3.6	Retinotopes Mapping	41
3.4	fMRT Studien zur visuellen Aufmerksamkeit.....	43
3.4.1	Ein physiologisches Korrelat des Spotlights.....	43
3.4.2	Ein physiologisches Korrelat der „Zoom Lens“	45
3.4.3	Suppressionszone um das Spotlight.....	46
3.4.4	Zur Teilbarkeit des Spotlights.....	47
4	Fragestellung.....	48
4.1	Stand der Forschung	48
4.2	Zwei Modelle der Aufmerksamkeit außerhalb des Spotlights.....	50
5	Experiment 1a: Verhaltensbefunde zur Distraktorhemmung	54
5.1	Methode	54
5.1.1	Probanden	54
5.1.2	Versuchsablauf.....	55
5.1.3	Versuchsdesign	55
5.1.4	Beschreibung der Blöcke und der Trialstruktur.....	56
5.1.5	Material	58
5.2	Ergebnisse	60
5.3	Diskussion.....	65
6	Experiment 1b: Distraktorhemmung fMRT.....	66
6.1.1	<i>Methode</i>	66
6.1.2	Probanden	67
6.1.3	Versuchsablauf.....	68
6.1.4	Versuchsdesign	68
6.1.5	Retinotopes mapping	69
6.1.6	Beschreibung der fMRT Messung	70
6.1.7	Aufbereitung der Daten.....	71
6.2	Ergebnisse	72
6.3	Diskussion.....	78
7	Experiment 2a : Kompatibilitätseffekt.....	80
7.1	Methode	81
7.1.1	Probanden	81

7.1.2	Versuchsablauf.....	81
7.1.3	Versuchsdesign	82
7.1.4	Versuchsmaterial.....	83
7.2	Ergebnisse	84
7.3	Diskussion.....	87
8	Experiment 2b: Kompatibilitätseffekt fMRT.....	88
8.1	Methode	88
8.1.1	Probanden	89
8.1.2	Versuchsdesign	89
8.1.3	Funktionelle Messung und Datenanalyse	89
8.2	Ergebnisse	90
8.3	Diskussion.....	95
9	Zusammenfassende Diskussion	96
9.1	Ergebnisse der Studie.....	96
9.2	Zu überdenkende Aspekte an der Methodik und der Interpretation der Befunde	98
9.2.1	Einfluss von Augenbewegungen auf die fMRT Daten	98
9.2.2	Einfluss der Instruktion auf zielkompatible Distraktoren	99
9.2.3	Unterscheidung von Hemmung und Verstärkung.....	99
9.2.4	Mögliche Verbesserungen der Untersuchungsmethoden.....	101
9.3	Weiterführende Fragestellungen	104
9.3.1	Variation der Komplexität der Aufgabenstellung.....	104
9.3.2	Variation des Abstands der Distraktoren zum Aufmerksamkeitsfokus ...	105
9.3.3	Zeitliche Dynamik der Distraktorhemmung	105
9.3.4	Distraktorhemmung bei taktiler Stimulation	106
9.4	Anwendungsfelder	106
9.4.1	Trainierbarkeit der Distraktorhemmung	106
9.4.2	Diagnose und Klassifikation von Aufmerksamkeitsstörungen.....	107
9.4.3	Distraktorhemmung und Lesefertigkeit	107
9.4.4	Distraktorhemmung und Werbepsychologie	108
9.5	Schlusswort	109
10	Literatur.....	110
11	Anhang	115
11.1	Abkürzungsverzeichnis.....	115
11.2	Akademischer Lebenslauf.....	116
11.3	Abstract	117
11.4	Erklärung über die selbständige Verfassung der Dissertation	118

1 Zusammenfassung

In vier experimentalpsychologischen Untersuchungen wurde geprüft, wie räumlich visuelle Aufmerksamkeit außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus verteilt ist. Es stellten sich die Fragen, ob bei der Suche nach einem Zielreiz innerhalb einer rapid serial visual presentation (RSVP) periphere Distraktoren im Vergleich zu leeren Orten weniger mit Aufmerksamkeit belegt sind und ob Aufmerksamkeit auf zielinkompatiblen Distraktoren schwächer verteilt ist als auf zielkompatiblen Distraktoren. Hierzu wurden sowohl Verhaltensdaten mittels der Probentechnik als auch Änderungen der BOLD Antworten in den korrespondierenden neuronalen Repräsentationen im visuellen Kortex erhoben. Der Vergleich beider Methoden erlaubt die Schlussfolgerung, dass periphere Distraktororte im Vergleich zu leeren Orten während der Identifikation von Zielreizen innerhalb einer RSVP unterdrückt werden. Zielkompatible Distraktoren werden weniger unterdrückt als zielinkompatible.

Die Ergebnisse der Studie reihen sich in eine Serie von Befunden ein, die belegen, dass sich die räumlich visuelle Aufmerksamkeitssteuerung nicht nur auf das Hervorheben des beachteten Bereichs beschränkt. Vielmehr findet auch eine aufgabenabhängige Aufmerksamkeitsverteilung außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus statt.

2 Vorwort

Wie ist es möglich, Aufmerksamkeit auf einen Ort zu richten, ohne die Augen zu bewegen? Wenn man sich beim Lesen auf eine Zeile des Textes konzentriert: Wird die gelesene Zeile hervorgehoben? Werden die benachbarten Zeilen aktiv ausgeblendet? Geschieht beides zur gleichen Zeit?

Die Relevanz dieser Fragen wird deutlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass Aufmerksamkeit ständig aufgebracht werden muss, um aus der Vielzahl der auf den Organismus einströmenden Reize die für das eigene Verhalten relevanten Reize auszuwählen. Die Fähigkeit, Aufmerksamkeit in kurzer Zeit zu verschieben, ist somit notwendig, um das Verhalten optimal an die gegebene Situation anzupassen.

Um die Funktionsweise der menschlichen Aufmerksamkeitssteuerung besser verstehen zu können, wurden in dieser Arbeit sowohl psychologische Verhaltensexperimente als auch Messungen der Gehirnaktivität mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) durchgeführt. Die fMRT ermöglicht es, dem Gehirn bei der Arbeit zuzusehen.

Die kognitive Neurologie befasst sich im Wesentlichen mit der Beschreibung, Erklärung, Vorhersage und der gezielten Veränderung der physiologischen Korrelate kognitiver Funktionen. Es handelt sich hierbei um ein stark interdisziplinäres Arbeitsfeld, mit dem sich Forscher mit unterschiedlichen akademischen Hintergründen befassen.

Es ist somit ein schwieriges Unterfangen, in dieser Arbeitsumgebung allgemeinverständlich zu publizieren. Die Gliederung dieser Arbeit wurde vor diesem Hintergrund gewählt. Im Grundlagenteil wird das zum weiteren Verständnis dieser Arbeit vorausgesetzte Wissen vermittelt. Erst im Anschluss daran wird auf die Fragestellung der Arbeit eingegangen, nach deren Darstellung die Beschreibung und Diskussion der durchgeführten Experimente erfolgt.

Die Gliederung des Textes ermöglicht es, dass Leser mit ausreichend Vorwissen den Grundlagenteil überspringen und in den späteren Kapiteln einsteigen können, um die durchgeführten Experimente nachzuvollziehen.

3 Grundlagen

Die Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit werden in diesem Kapitel erläutert. Es beginnt mit einem Überblick über den aktuellen Stand experimental-psychologischer Forschung zur räumlich visuellen Aufmerksamkeit. Neben einer Arbeitsdefinition der Aufmerksamkeit erfolgt die Beschreibung des Spotlight Modells und der Befunde psychologischer Verhaltensexperimente.

Im Anschluss daran wird die Anatomie des visuellen Systems beschrieben. Die Darstellung wird anhand anatomischer Schnittbilder vorgenommen, die während der Durchführung der weiter unten beschriebenen Experimente aufgenommen wurden.

Der fMRT wird etwas mehr Platz eingeräumt. Zwei Schwerpunkte bilden hierbei die Darstellung der physikalischen Grundlagen des MR-Signals¹ und der Eigenschaften der BOLD Antwort.

Im letzten Abschnitt werden einige mittels fMRT gewonnene Befunde zur visuellen Aufmerksamkeit vorgestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Ergebnisse physiologischer Messungen die aus den Verhaltensexperimenten geschlossenen Modelle stützen.

¹ Magnetresonanzsignal

3.1 Experimentalpsychologische Aufmerksamkeitsforschung

Alle für diese Arbeit durchgeführten Experimente untersuchen Fragen zur visuellen Aufmerksamkeit. In diesem Abschnitt wird zuerst eine Arbeitsdefinition von Aufmerksamkeit vorgenommen. Im Anschluss daran erfolgt die Darstellung zweier klassischer Modelle visueller Aufmerksamkeit: Die Spotlight Metapher und das von ihr abgeleitete Zoom Lens Modell. Zusätzlich wird ein Überblick über die zur Prüfung der Modelle durchgeführten Verhaltensexperimente gegeben.

Der Überblick beschränkt sich auf räumlich visuelle Aufmerksamkeit. Für ausführlichere Darstellungen über den Stand der Aufmerksamkeitsforschung, auch im Hinblick auf andere Sinnesmodalitäten, sei auf die Lehrbücher von Parasuraman (2000) oder Pashler (1998) verwiesen.

3.1.1 Arbeitsdefinition Aufmerksamkeit

Eine der ersten wissenschaftlichen Definitionen der Aufmerksamkeit stammt von William James (1890):

„Everyone knows what attention is. It is the taking possession of the mind, in clear and vivid form, of one out of several possible objects or trains of thought. Focalisation, concentration of consciousness are of its essence. It implies withdrawal from some things in order to deal effectively with others“ (S. 403-404).

Wie in den meisten anderen Definitionen wird hier hervorgehoben, dass auf das menschliche Informationsverarbeitungssystem ständig mehr Informationen einströmen als es verarbeiten kann. Daraus folgend definieren Anderson (1995) und Atkinson, Atkinson, Smith, Bem und Nolen-Hoeksema (1996) Aufmerksamkeit als einen Selektionsmechanismus, der aus der Vielzahl der einströmenden Informationen diejenigen auswählt, die für den Organismus von Bedeutung sind.

Aufmerksamkeit ermöglicht somit die Zuwendung kognitiver Ressourcen auf die relevanten Reize und das gleichzeitige Nichtbeachten irrelevanter oder sogar störender Reize. Zu der Frage, wie diese Auswahl der relevanten Information erfolgt, wurden etliche konkurrierende Modelle entwickelt. Zwei der bekanntesten werden im Folgenden dargestellt.

3.1.2 „Spotlight“ und „Zoom Lens“ der visuellen Aufmerksamkeit

Die Spotlight Metapher (Posner, Snyder, & Davidson, 1980) und das verwandte Modell der Zoom Lens (Eriksen & St James, 1986) gehören zu den populärsten Modellen der Aufmerksamkeitsforschung. Ihre Popularität verdanken sie wohl ihrer Bildhaftigkeit und der daraus folgenden Einfachheit, aus ihren Vorhersagen experimentalpsychologische Untersuchungen herzuleiten. Schon lange ist bekannt, dass beide Modelle die Komplexität der tatsächlichen Aufmerksamkeitsmechanismen nicht vollständig und teilweise sogar fehlerhaft beschreiben (Cave & Bichot, 1999; Reber, 1989; Shaw & Shaw, 1977). Trotz aller Kritik wird auch in dieser Arbeit das Spotlight Modell herangezogen, um die experimentelle Fragestellung zu verdeutlichen.

Posner et al. (1980) waren die ersten, die Aufmerksamkeit mit dem Strahl eines Scheinwerfers verglichen. Durch die Limitierung der Kapazität des visuellen Informationsverarbeitungssystems erschien es naheliegend, dass der Selektionsmechanismus den Ort im Sehfeld als einfaches Kriterium zur Informationsauswahl verwendet. Durch die Beschränkung der Verarbeitung auf einen Bereich im Sehfeld lässt sich die Menge der zu verarbeitenden Information drastisch reduzieren. Die Spotlight Metapher spiegelte den damaligen Stand der Befunde zur räumlichen visuellen Aufmerksamkeit sehr gut wieder. Hierbei galt der Grundgedanke, dass alle Reize innerhalb des beachteten Bereichs besser verarbeitet werden als die Reize außerhalb des Spotlights. Das Wissen, wo im Raum ein Zielreiz zu erwarten ist, beschleunigt die Reaktion auf den Reiz. Dies gilt auch, wenn die Augen nicht bewegt werden (Eriksen & Hoffman, 1974; Posner & Cohen, 1984; Posner et al., 1980).

Es stellte sich die Frage, ob Aufmerksamkeit beim Wechsel von einem Ort zum anderen im Raum sprunghaft verschoben werden kann oder ob sie wie ein kontinuierlich leuchtender Scheinwerfer über die dazwischen liegenden Orte streift. Seit den ersten Studien von Shulman, Remington und McLean (1979) wurden etliche Replikationen mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt. Zusammenfassend kann postuliert werden, dass Aufmerksamkeit von einem Ort zum anderen verschoben werden kann, ohne dass die dazwischen liegenden Orte dabei beachtet werden müssen. Das Spotlight scheint sich also nicht wie ein Scheinwerfer zu bewegen, sondern diskret von einem Ort zum andern springen zu können (Cave & Bichot, 1999).

Aus der Metapher wurde auch die Frage der Bewegungsgeschwindigkeit des Aufmerksamkeitsfokus im Sehfeld abgeleitet. Wie lange benötigt das Spotlight, um von einem Ort zum anderen verschoben zu werden? Ist die Dauer von der Entfernung der Orte abhängig? Tsal (1983) fand in seinen Studien, dass die Zeitdauer der Aufmerksamkeitsverschiebung von der Entfernung der Orte abhängig ist. Die Studie wurde jedoch später in Frage gestellt (Eriksen & Yeh, 1985; Remington & Pierce, 1984), so dass man heute davon ausgeht, dass die Dauer einer Aufmerksamkeitsverschiebung nicht von der zu überbrückenden Entfernung abhängt. Dieser Befund spricht unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit gegen die kontinuierliche Verschiebung des Aufmerksamkeitsfokus.

Eine von Anfang an umstrittene Eigenschaft der Spotlightmetapher war die Unteilbarkeit des Aufmerksamkeitsfokus. Zu einem Zeitpunkt sollte immer nur ein Ort hervorgehoben werden können. Diese Vorhersage konnte jedoch nicht bestätigt werden. Das gleichzeitige Beobachten verschiedener Orte scheint möglich zu sein (McMains & Somers, 2004; Shaw & Shaw, 1977).

Im Alltag begegnet man visuellen Stimuli mit unterschiedlicher Größe. Es erscheint somit nahe liegend, dass auch die Größe des beachteten Orts im Sehfeld variiert werden kann. Dies konnte schon in frühen Studien belegt werden (H. Egeth, 1977). Die Größe des Aufmerksamkeitsfokus lässt sich tatsächlich variieren. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Effektivität der Informationsverarbeitung von der Größe des beachteten Bereichs abhängt. Je kleiner der Fokus der Aufmerksamkeit, desto effektiver verläuft die Verarbeitung. Dies führte zur Formulierung des Zoom Lens Modells als Erweiterung der Spotlight Metapher (Eriksen & St James, 1986). Aufmerksamkeit wird hierbei mit einem Kameraobjektiv mit variabler Brennweite verglichen, das je nach Einstellung große oder kleine Bereiche abbilden kann.

Auch der Übergang vom beachteten zum unbeachteten Bereich im Sehfeld wurde in etlichen Verhaltensstudien untersucht. Es wurde angenommen, dass der Übergang nicht schlagartig verläuft sondern einem Gradienten folgt. Zusätzlich wurden Belege für eine das Spotlight umschließende Suppressionszone gesammelt (Cutzu & Tsotsos, 2003; Müller, Mollenhauer, Rösler, & Kleinschmidt, 2005).

3.1.3 Behaviorale Messung der Aufmerksamkeitsverteilung

In der über hundertjährigen Geschichte experimentalpsychologischer Forschung sind zahlreiche Untersuchungsmethoden entwickelt worden, um die Verteilung von Aufmerksamkeit nichtinvasiv messen zu können. Grundsätzlich werden in den Experimenten mindestens zwei unterschiedliche Bedingungen geschaffen. Die Bedingungen dürfen sich einzig hinsichtlich der Aufmerksamkeitsverteilung der Probanden unterscheiden. Es dürfen keine weiteren Unterschiede bestehen.

Als klassisches Beispiel kann das von Posner berichtete Paradigma der räumlichen Hinweise gewertet werden (Posner, 1980; Posner et al., 1980). In den Experimenten sollten Probanden die Bildschirmmitte fixieren und beim Erscheinen eines rechts oder links dargebotenen Zielreizes schnellstmöglich mit einem Tastendruck reagieren. Kurz vor der Darbietung bekamen die Probanden einen Hinweisreiz über den Ort des Ziels dargeboten. Es zeigte sich, dass Probanden schneller auf die dargebotenen Ziele reagieren, wenn sie zuvor einen Hinweis über deren Erscheinungsort bekamen als wenn keine Hinweise gegeben wurden. In experimentellen Durchgängen, in denen der Hinweis einen falschen Ort vorhersagte, (in denen das Ziel somit an einem anderen Ort erschien) waren die Reaktionen im Vergleich zu Durchgängen ohne Hinweisreize verlangsamt. Die Befunde wurden durch unterschiedlich verteilte Aufmerksamkeit erklärt. Es wurde angenommen, dass die Probanden ihren Aufmerksamkeitsfokus auf die vom Hinweisreiz markierten Orte verschoben. Wenn die Ziele dann tatsächlich an den markierten Orten erschienen, führte die erhöhte Aufmerksamkeit dort zu einer schnelleren Verarbeitung der Reize und ermöglichte somit eine schnellere Reaktion. Der gegensätzliche Effekt trat bei falschen Hinweisreizen auf. Dadurch, dass die Probanden ihren Aufmerksamkeitsfokus vom Fixationsort auf einen falschen Ort verschoben, erhöhte sich der Abstand des Aufmerksamkeitsfokus vom tatsächlichen Zielort. Die im Vergleich zur Bedingung ohne Hinweisreiz reduzierte Aufmerksamkeitsverteilung auf dem Zielort führte zur verlangsamt Verarbeitung und somit zu längeren Reaktionszeiten.

In der Literatur lassen sich etliche weitere Paradigmen der Messung der Aufmerksamkeitsverteilung finden, die an die von Posner verwendete Methode angelehnt sind (Cepeda, Cave, Bichot, & Kim, 1998; Facoetti, 2001; Klein, 1988; Müller et al., 2005).

Es ist zu beachten, dass die bei Experimenten zur Aufmerksamkeitsverteilung beobachteten Reaktionszeitunterschiede selten mehr als 100 ms betragen. Hier wird deutlich, dass die Verwendung elektronisch gesteuerter Stimuluspräsentation und Antwortregistrierung zur Gewinnung aussagekräftiger Befunde unerlässlich ist.

3.2 Anatomie des visuellen Systems

Die Beschreibung der Anatomie des visuellen Systems beginnt mit der Darstellung, wie Information über die visuelle Sehbahn von der Netzhaut des Auges durch das Gehirn zum visuellen Kortex geleitet wird. Darauf folgt die Beschreibung der frühen visuellen Areale des Kortex. Hierbei wird der Schwerpunkt auf die Beschreibung der retinotopen Organisation der frühen visuellen Informationsverarbeitungssysteme gelegt. Mit der Darstellung von physiologischen Befunden zur räumlich visuellen Aufmerksamkeit endet das Kapitel. Für ausführlichere Darstellungen des Themas wird auf Pinel (1997) und Bierbaumer & Schmidt (1991) verwiesen.

3.2.1 Vom Auge zum Kortex

Der Verbindungsweg zwischen den Netzhäuten der Augen und dem primären visuellen Kortex wird als zentrale Sehbahn bezeichnet. Ihr Verlauf wird anhand von Schnittbildern des Gehirns dargestellt.

Sobald Licht auf die Stäbchen und Zapfen der Retina des Auges trifft, werden Signale erzeugt, die anschließend über einige Verschaltungen an Ganglienzellen weitergeleitet werden. Die Axone der Ganglienzellen vereinigen sich innerhalb der Retina zum Sehnerven und verlassen von dort aus gebündelt das Auge (Abbildung 1A). An dem Ort, an dem der Sehnerv das Auge verlässt, befinden sich keine Rezeptoren. Deshalb wird er blinder Fleck genannt.

Nachdem die zentrale Sehbahn das Auge verlassen hat, kreuzt ein Teil der Nervenfasern zur kontralateralen Großhirnhälfte (Abbildung 1B). An der Sehnervengkreuzung (Chiasma Opticum) wird der Großteil der Information aus dem linken Gesichtsfeld an die rechte Großhirnhälfte geleitet, während Information aus dem rechten Gesichtsfeld vorwiegend in die linke Großhirnhälfte gelangt.

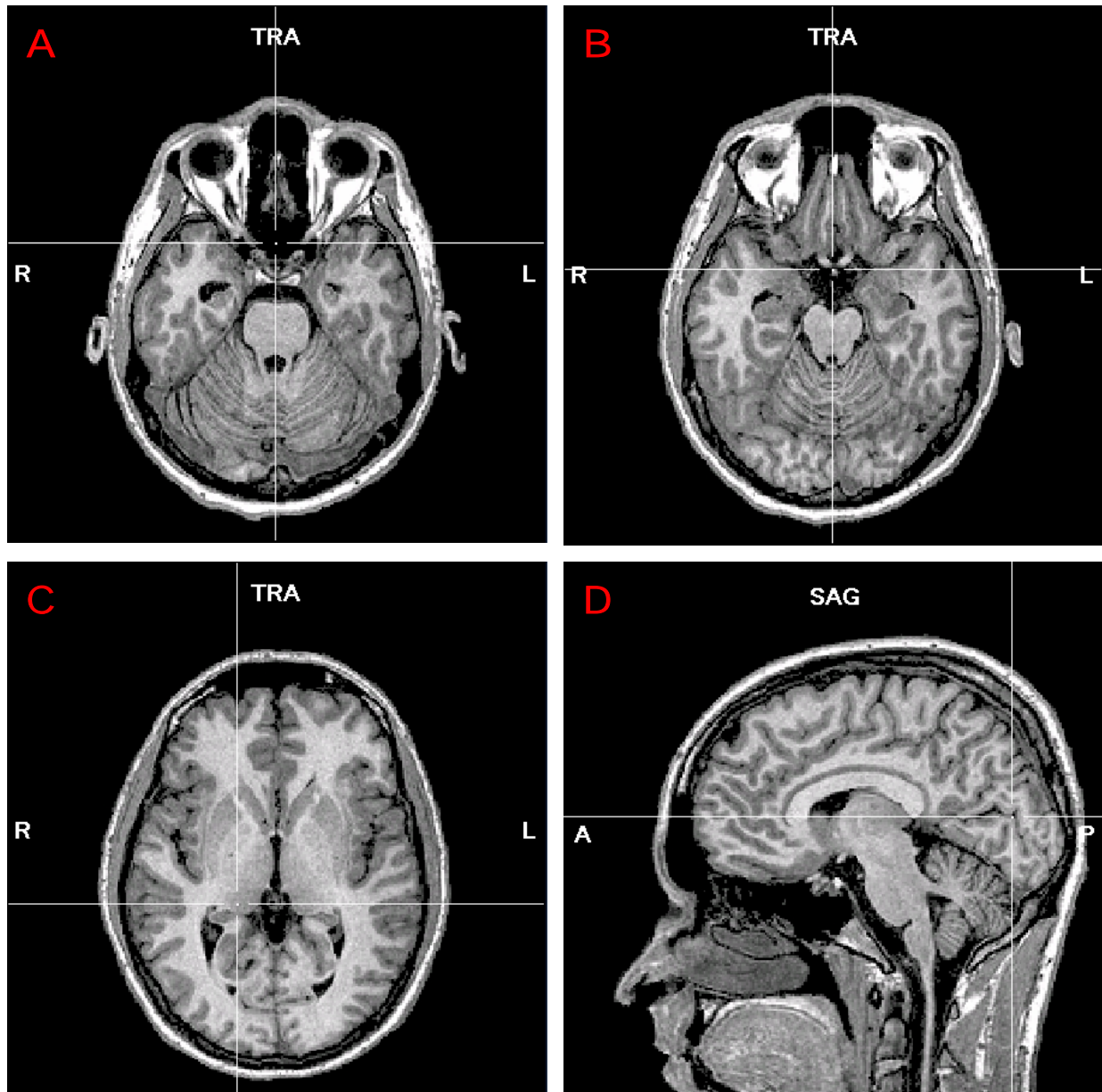


Abbildung 1. Verlauf der Sehbahn vom Auge zum primären visuellen Kortex. Nachdem die Axone gebündelt die Augen verlassen (A), kreuzt die Sehbahn, so dass ein Großteil der Information des linken Gesichtsfelds zur rechten Großhirnhälfte und Information des rechten Gesichtsfelds zur linken Hemisphäre geleitet wird (B). Im Corpus Geniculatum Laterale des Thalamus wird die Information weiter verarbeitet (C), bevor sie zum entlang der Calcarina gelegenen Kortexareal V1 geleitet wird (D).

Die nächste Zwischenstation der zentralen Sehbahn ist der seitliche Kniehöcker (Corpus Geniculatum Laterale) des Thalamus.

Vom Thalamus aus wird ein Teil der auf der zentralen Sehbahn übermittelten Information zum primären visuellen Kortex weitergeleitet (Abbildung 1C). Andere Nervenverbindungen laufen vom Thalamus aus zu unterschiedlichen Bereichen des Gehirns.

Der primäre visuelle Kortex (andere Bezeichnungen sind V1, striatärer Kortex oder Area Striata) befindet sich im Hinterhauptslappen des Gehirns (Abbildung 1D). In jeder Großhirnhälfte verläuft V1 entlang des Sulcus Calcarina. Information der oberen Gesichtsfeldhälfte gelangt zu V1 unterhalb des Sulcus Calcarina, während Information der unteren Gesichtsfeldhälfte oberhalb des Sulcus Calcarina weiterverarbeitet wird.

Von V1 aus wird die verarbeitete Information an höhere visuelle Areale weitergeleitet.

3.2.2 Visuelle Areale

Durch die Entwicklung leistungsfähiger Methoden zur Untersuchung des visuellen Systems ist das Wissen über dessen Funktionsweise in den letzten Jahren dramatisch gestiegen. Mittels unterschiedlicher methodischer Ansätze wurden über 25 visuelle Areale eingegrenzt (Serenio et al., 1995). In diesem Kapitel soll der Stand des Wissens über die Organisation der frühen visuellen Areale des Kortex zusammenfassend dargestellt werden. Das Prinzip der retinotopen Organisation wird zuerst erläutert. Anschließend wird in einzelnen Abschnitten auf die frühen visuellen Areale eingegangen.

Auf dem aufgefalteten Kortex sind die frühen visuellen Areale V1, V2, V3, VP, V3a und V4/V8 als parallel verlaufende Bänder entlang der Calcarina angeordnet (Abbildung 2). Hinsichtlich der Benennung der Areale jenseits von V3 besteht noch kein Konsens. Die genaue Verschaltung der Areale ist noch unklar. Es scheinen sich jedoch zwei Prinzipien in der Verschaltung finden zu lassen: Die hierarchische Organisation und die Spezialisierung. Zum einen verläuft der Informationsfluss größtenteils von den niedrigen Arealen zu höher liegenden, zum anderen reagieren die verschiedenen Areale je nach Stimulus unterschiedlich stark. Zur Vertiefung des Themas wird auf Grill-Spector & Malach (2004) verwiesen.

3.2.2.1 Retinotopie

Die Neurone im visuellen Kortex sind auf die Verarbeitung von Reizen an festgelegten Orten im Sehfeld spezialisiert. Der den Neuronen zugeordnete Bereich im Sehfeld wird rezeptives Feld genannt. Neurone werden durch visuelle Stimulation nur dann aktiviert, wenn die Stimuli in ihrem rezeptiven Feld dargeboten werden.

Die zentrale Sehbahn ist retinotop organisiert: Stimuli, die auf benachbarte Orte der Retina treffen, werden von benachbarten Neuronen im visuellen Kortex verarbeitet. Benachbarte Neurone besitzen somit benachbarte rezeptive Felder.

Die retinotop Organisation ist sowohl im Corpus Geniculatum Laterale als auch in den frühen visuellen Arealen des Kortex vorhanden. Der Ausprägungsgrad der Retinotopie sinkt in den höheren visuellen Arealen.

Die retinotop Organisation der frühen visuellen Areale ermöglicht die Voraussage, an welchem Ort des Gehirns bestimmte Bereiche des Sehfelds verarbeitet werden. Je weiter entfernt ein Reiz vom Fixationsort im Sehfeld dargeboten wird, desto weiter anterior² am Sulcus Calcarina ist dessen Repräsentation in V1 zu erwarten. Der Fixationsort wird an dem am weitesten posterior liegenden Bereich von V1 verarbeitet. Je weiter ein Stimulus überhalb des Fixationsortes im Sehfeld erscheint, desto weiter ventral der Calcarina ist dessen Repräsentation in V1 zu erwarten und umgekehrt.

Die Abbildung der Orte des Sehfelds im Kortex erfolgt stark verzerrt. Orte, die sich nahe dem Zentrum des schärfsten Sehens befinden, werden von einer größeren Kortexfläche repräsentiert als die Peripherie. Dies wird kortikaler Vergrößerungsfaktor genannt. Da der kortikale Vergrößerungsfaktor beim Menschen wenig zu variieren scheint, können die in Experimenten verwendeten Stimuli gezielt angepasst werden, um eine Kortexfläche vergleichbarer Größe zu stimulieren (Slotnick, Klein, Carney, & Sutter, 2001).

² Die Verwendung von anterior (vorne), posterior (hinten), dorsal (oben) und ventral (unten) sind als anatomische Richtungsbezeichnungen im Gehirn üblich.

3.2.2.2 V1

Das visuelle Areal V1 verläuft in beiden Gehirnhälften parallel zum Sulcus Calcarina. Ein Großteil der Nervenleitungen der visuellen Sehbahn verläuft vom Corpus Geniculatum Laterale direkt zu V1. V1 ist das größte visuelle Areal. Die retinotopische Organisation ist hier am stärksten ausgeprägt. Die Größe der rezeptiven Felder wird auf weniger als 2° Sehwinkel geschätzt (Kastner et al., 2001; Slotnick et al., 2001). V1 ist in beiden Gehirnhälften vorhanden. V1 der linken Gehirnhälfte verarbeitet die rechte Hälfte des Sehfelds, während V1 der rechten Gehirnhälfte die linke Hälfte des Sehfelds verarbeitet. Der dorsale Randbereich von V1 verarbeitet Stimuli, die in der Nähe des unteren vertikalen Meridians³ dargeboten werden, während der ventrale Randbereich von V1 Stimuli in der Nähe des oberen vertikalen Meridians verarbeitet (Engel, Glover, & Wandell, 1997).

V1 scheint vorwiegend auf die Verarbeitung grundlegender Merkmale spezialisiert zu sein.

Die Aktivierung in V1 steigt mit dem Kontrast des dargebotenen Stimulus (Avidan et al., 2002) und korreliert mit der Wahrscheinlichkeit, dass Probanden Muster mit niedrigem Kontrast von Rauschen unterscheiden können (Reiss & Heeger, 2003).

Es werden drei charakteristische Zellarten in V1 unterschieden: Einfache Zellen, komplexe Zellen und endinhibierte Zellen (Hubel & Wiesel, 1959, 1968, 1969).

Einfache Zellen reagieren maximal auf streifenförmige Reize einer bestimmten Ausrichtung. Komplexe Zellen reagieren ebenso, jedoch nur, wenn sich die Streifen in einer bestimmten Richtung über das rezeptive Feld der Zellen bewegen. Endinhibierte Zellen reagieren am stärksten auf sich bewegende Linien festgelegter Länge.

Auf den höheren Verarbeitungsebenen sind spezifischere Reize notwendig, um die Neurone zum Feuern anzuregen (Goldstein, 1996). Die Rezeptoren der Retina reagieren praktisch auf jeden visuellen Reiz, während die endinhibierten Zellen in V1 nur noch auf Streifen mit bestimmter Länge und

³ Die Trennlinie zwischen der linken und der rechten Hälfte des Sehfelds wird als vertikaler Meridian bezeichnet. Die Trennlinie zwischen oberer und unterer Sehfeldhälfte wird als horizontaler Meridian bezeichnet.

Bewegungsrichtung reagieren. Diese Spezialisierung der Neuronen nimmt in den höheren visuellen Arealen noch weiter zu.

3.2.2.3 V2

Das entlang dem Sulcus Calcarina gelegene visuelle Areal V1 wird in jeder Großhirnhälfte sowohl dorsal als auch ventral von V2 eingegrenzt (Abbildung 2). Jedes der 4 Areale V2 verarbeitet Reize eines Quadranten des Sehfelds. Das dorsal gelegene V2 verarbeitet Stimuli der unteren Hälfte des Sehfelds, während das ventral gelegene V2 Stimuli der oberen Hälfte des Sehfelds verarbeitet. Die Größe der rezeptiven Felder in V2 ist mit 2-4° Sehwinkel mehr als doppelt so hoch wie in V1 (Slotnick et al., 2001).

Sowohl V1 als auch V2 bilden das gesamte Sehfeld in eigenen retinotopen Karten ab. Für jeden Ort des Sehfelds existieren sowohl in V1 als auch in V2 Neuronen mit korrespondierendem rezeptiven Feld. Geeignete Stimuli lösen somit sowohl in V1 als auch in V2 neuronale Antworten aus.

Über die genaue Arbeitsteilung von V1 und V2 ist noch wenig bekannt. Es gibt jedoch charakteristische Unterschiede zwischen den Arealen, die eine exakte Zuordnung der Kortexfläche erlauben.

Es wurde berichtet, dass die rezeptiven Felder der Neuronen an der dorsalen Grenze von V1 den unteren vertikalen Meridian des Sehfelds abbilden, während die Neuronen an der ventralen Grenze von V1 den oberen vertikalen Meridian repräsentieren.

Die retinotope Karte von V2 steht im Vergleich zu V1 auf dem Kopf. Reize in der Nähe des oberen vertikalen Meridians werden in dem an V1 angrenzenden Bereich im Kortex verarbeitet. An der Grenze zum Areal V3/VP wird der horizontale Meridian abgebildet (Engel et al., 1997).

Die auf dem Kopf stehende Repräsentation des Sehfelds in V2 wird gezielt zur Bestimmung der Grenzen der visuellen Areale im Kortex verwendet. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Grenzen ist in späteren Teilen dieser Arbeit beschrieben.

3.2.2.4 V3/VP und V3a

In jeder Hirnhälfte wird das an das dorsale V2 angrenzende visuelle Areal V3 genannt, während die an das ventrale V2 angrenzende Region als VP bezeichnet wird. An V3 angrenzend liegt das Areal V3a. V3a kommt somit nur einmal in jeder Hirnhälfte vor (Engel et al., 1997). V3a bildet den oberen und den unteren Quadranten des kontralateralen Sehfelds ab. Die Aussage, dass der gesamte dorsal der Calcarina liegende visuelle Kortex ausschließlich Signale der unteren Hemisphäre des Sehfelds verarbeitet, trifft also nicht zu (Tootell et al., 1997). Die Benennung von V3a hat historische Gründe. V3a wurde nach dem Areal V4 entdeckt. Um V4 nicht umbenennen zu müssen, wurde es „V3 accessory“ getauft. Obwohl die Bezeichnung verwirrend ist, ist V3a ein funktionell sowie histologisch eigenständiges Areal.

Die Größe der rezeptiven Felder in V3/ V3a wird auf über 6° Sehwinkel geschätzt (Slotnick et al., 2001). Die Ausrichtung der retinotopen Kartierung entspricht der von V1. Sie steht somit im Vergleich zu V2 auf dem Kopf. Dies ermöglicht die Bestimmung der Grenze zwischen V2 und V3/VP.

3.2.2.5 V4

Das visuelle Areal V4 ist nur einmal in jeder Großhirnhemisphäre vorhanden (Grill-Spector & Malach, 2004). Es grenzt anterior an VP an und liegt ventral der Calcarina. Die Größe der rezeptiven Felder wird auf 4-6° Sehwinkel geschätzt (Slotnick et al., 2001). Organisation und Benennung von V4 und der höheren Areale sind noch umstritten.

Es ist auch noch nicht geklärt, ob V4 das gesamte kontralateral gelegene visuelle Halbfeld abbildet oder nur einen Quadranten des Sehfelds (Kastner et al., 2001). V4 scheint stark an der Verarbeitung von Farbe beteiligt zu sein. Studien berichten von beeinträchtigtem Farbsehen bei V4 Läsionen. Es sind auch Einzelzellenableitungen bekannt, bei denen gezeigt wurde, dass Neuronen in V4 selektiv auf Farben reagieren.

Es wurden noch über 25 weitere visuelle Areale von verschiedenen Arbeitsgruppen mit unterschiedlichen Methoden bestimmt. Hier besteht jedoch nur sehr wenig Konsens zwischen den verschiedenen Befunden.

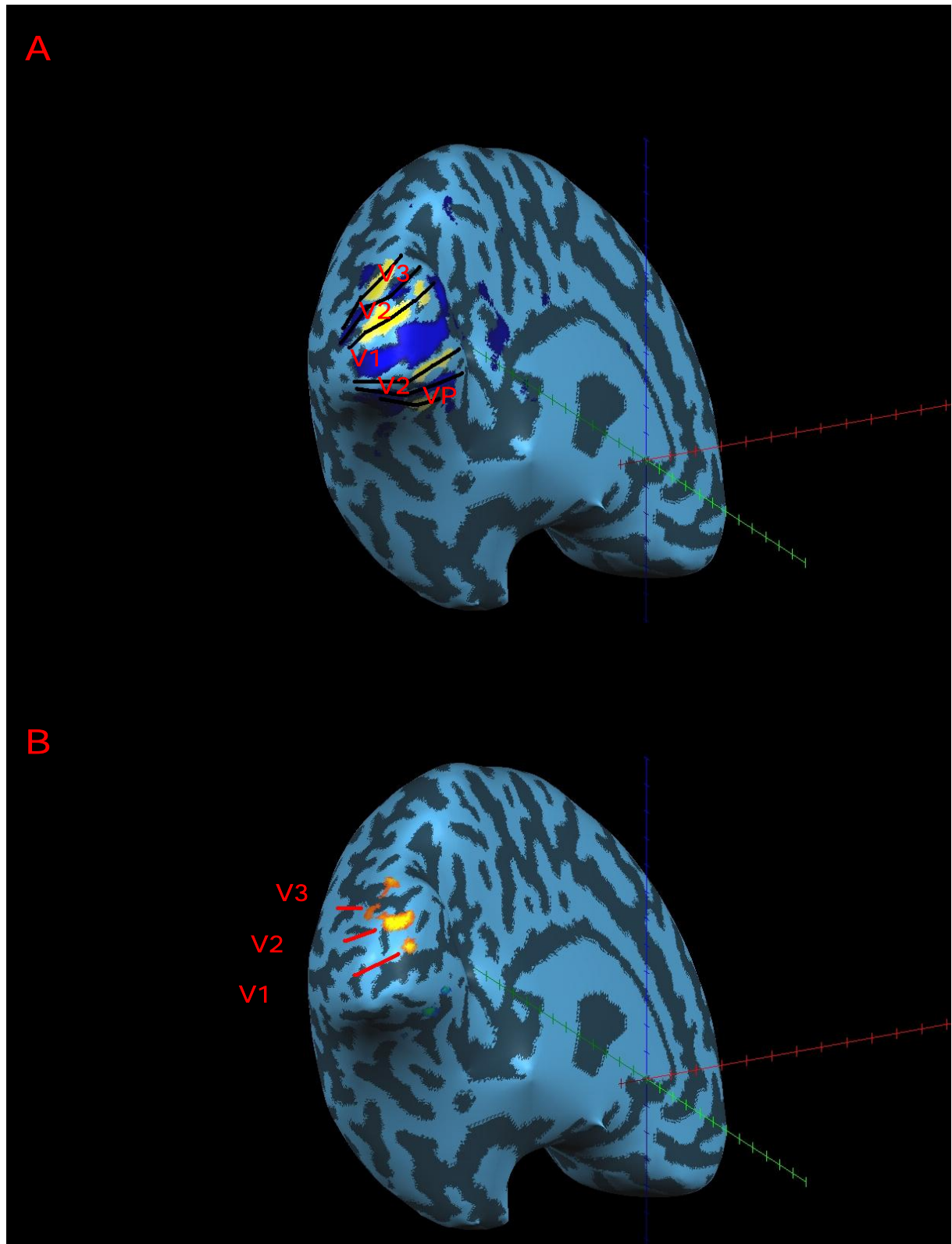


Abbildung 2. Die frühen visuellen Kortextareale V1, V2 und V3/VP. Die obere Abbildung (A) zeigt den Verlauf der parallel zur Calcarina angeordneten Grenzen der frühen visuellen Areale. Das dorsal der Calcarina gelegene an V2 angrenzende Areal wird V3 genannt, während das ventral gelegene Areal als VP bezeichnet wird. Die untere Abbildung (B) zeigt die Aktivierung der kortikalen Repräsentationen eines Stimulus, der in der unteren Hälfte des rechten Sehfelds dargeboten wurde. Es sind signifikante Aktivierungen in V1, V2 und V3 beobachtbar.

3.2.2.6 V5/ hMT+

Das Areal hMT+ ist in jeder Großhirnhälfte nur einmal vorhanden. Es befindet sich an der Kreuzung zwischen Occipital- Temporal- und Parietallappen. Es scheint besonders auf die Verarbeitung von Bewegungen spezialisiert zu sein (Zeki et al., 1991). Die Neurone des Areals reagieren stärker auf bewegte als auf stillstehende Reize. Weiterhin lösen Lichtpunkte, die sich in die gleiche Richtung bewegen, größere Aktivierungen aus als Punkte, die sich zufällig durcheinander bewegen. Darüber hinaus wird von beeinträchtigtem Bewegungssehen bei hMT+ Läsionen berichtet.

hMT+ repräsentiert jeweils die kontralateral gelegene Hemisphäre des Sehfelds. Es scheint retinotop organisiert zu sein (Huk, Dougherty, & Heeger, 2002).

3.2.3 Visuelle Aufmerksamkeit im Gehirn

In einem Übersichtsartikel zur visuellen Aufmerksamkeit im Gehirn wurden 4 klassische Fragen diskutiert (Kanwisher & Wojciulik, 2000): Auf welchen Ebenen der Informationsverarbeitung wirkt Aufmerksamkeit? Anhand welcher Merkmale können Stimuli durch Aufmerksamkeit ausgewählt werden? Wie verändert Aufmerksamkeit die neuronale Antwort auf einen Stimulus? Welche Areale im Gehirn steuern Aufmerksamkeit? Jeder dieser Fragen wird in diesem Kapitel ein Abschnitt gewidmet.

3.2.3.1 Auf welchen Verarbeitungsebenen wirkt Aufmerksamkeit?

Eine Frage der Aufmerksamkeitsforschung ist, auf welcher Verarbeitungsebene Information durch Aufmerksamkeit ausgewählt wird.

Die Theorie der späten Auswahl behauptet, dass sämtliche visuelle Information zu einem hohen Grad verarbeitet wird. Die Verarbeitung soll bis zur Objekterkennung von Aufmerksamkeit unbeeinflusst geschehen. Erst im Anschluss an die Objekterkennung soll Aufmerksamkeit aus der Menge der verarbeiteten Stimuli die relevantesten auswählen.

Die Theorie der frühen Auswahl behauptet hingegen, dass schon auf den unteren Ebenen der Verarbeitung Informationsauswahl stattfindet. Hierdurch würde nur ein sehr geringer Teil der Information von höheren Arealen verarbeitet.

Die gegensätzlichen Theorien wurden in etlichen physiologischen Studien verglichen. Längere Zeit sprachen die Befunde für die Theorie der späten Auswahl. In frühen Studien wurde berichtet, dass die räumliche Aufmerksamkeitsverschiebung im extrastriären visuellen Kortex zu Aktivitätsänderungen führt, während keine Veränderungen in V1 zu beobachten waren (Clark & Hollyard, 1996; Heinze et al., 1994). Aufmerksamkeit sollte also erst in höheren visuellen Arealen veränderte neuronale Antworten bewirken.

Die Befunde waren jedoch umstritten. Es wurde kritisiert, dass die räumliche Aufmerksamkeitssteuerung gerade in V1 zu beobachten sein sollte, da die rezeptive Feldgröße in V1, im Vergleich zu den höheren Arealen, am geringsten und die retinotop Organisation am stärksten ausgeprägt ist (Tootell et al., 1998). Tatsächlich konnten in den letzten Jahren etliche Studien aufmerksamkeitsbedingte Aktivitätsänderungen in V1 nachweisen (McMains & Somers, 2004; Müller, Bartelt, Donner, Villringer, & Brandt, 2003; Tootell et al., 1998).

Die durch Aufmerksamkeit bewirkte Veränderung neuronaler Aktivität in V1 wird augenblicklich als Beleg für die Theorie der frühen Auswahl gewertet. Fest steht, dass die Verschiebung räumlicher Aufmerksamkeit auf einen Ort im Sehfeld mit einem Aktivitätsanstieg in den korrespondierenden neuronalen Repräsentationen der retinotop organisierten visuellen Kortexareale einhergeht.

3.2.3.2 Anhand welcher Merkmale werden Stimuli ausgewählt?

Weitere Untersuchungen wurden zu der Frage durchgeführt, anhand welcher Merkmale relevante Stimuli durch Aufmerksamkeit ausgewählt werden. Es konnte gezeigt werden, dass neben dem Ort im Sehfeld auch andere Merkmale, wie Farbe, Bewegungsrichtung oder ganze Objekte ausgewählt werden können.

Es wurde belegt, dass bei der Verwendung der Bewegungsrichtung als Kriterium der Auswahl relevanter Reize, die Aktivität in der an der Bewegungsverarbeitung beteiligten Region hMT+ im Vergleich zu einer Kontrollbedingung ansteigt (O'Craven, Downing, & Kanwisher, 1999).

Das Beobachten eines Gesichts erhöht die Aktivität in dem an der Gesichtsverarbeitung beteiligten fusiformen Gesichtsareal, während das Beobachten eines Hauses die Aktivität in einem an der Ortverarbeitung beteiligten Areal erhöht.

Das Beobachten eines Merkmals geht also mit einer erhöhten Aktivität der neuronalen Repräsentation einher.

3.2.3.3 Wie wird die neuronale Antwort durch Aufmerksamkeit verändert?

Zwei Mechanismen für die Aktivitätsänderung der kortikalen Repräsentationen beobachteter Merkmale wurden postuliert. Es könnte die Grundaktivität der Kortexareale oder die Stärke der Antwort auf einen relevanten Stimulus verändert werden. Für beide Mechanismen wurde Evidenz aus physiologischen Daten berichtet (Kastner, Pinsk, De Weerd, Desimone, & Ungerleider, 1999).

Eine weiterhin nicht vollständig beantwortete Frage betrifft die Art und Weise, wie Aktivitätsunterschiede zwischen relevanten und irrelevanten Merkmalsrepräsentationen erzeugt werden. Eine Möglichkeit bestünde im Anheben der relevanten, eine weitere im Absenken der irrelevanten Repräsentationen. Verhaltensexperimente zeigen Belege für beide Mechanismen (Posner et al., 1980). Auch Befunde physiologischer Messungen weisen in dieselbe Richtung (Hillyard & Anllo-Vento, 1998).

3.2.3.4 Welche Areale im Gehirn steuern Aufmerksamkeit?

Gehirnregionen im Frontal- und im Parietallappen wurden schon lange mit der Aufmerksamkeitssteuerung in Zusammenhang gebracht, da das Zerstören des Gewebes mit starken Aufmerksamkeitsdefiziten einherging (Mesulam, 1981). Tatsächlich konnten auch funktionelle Messungen der betreffenden Hirnregionen diese Vermutung stützen und alternative Erklärungen ausschließen helfen (Kanwisher & Wojciulik, 2000).

Corbetta & Shulman (2002) unterteilen das fronto-parietale Netzwerk in zwei Subsysteme. Ein System soll an der Vorbereitung und Durchführung von top-down Steuerung der Aufmerksamkeit beteiligt sein, während das andere System am Erkennen unerwarteter, besonders salienter oder für das Verhalten relevanter Stimuli zuständig ist. Das System zur top-down Steuerung der Aufmerksamkeit soll im dorsalen posterioren Parietalkortex und dem frontalen Kortex gelegen sein. Das für die Bewertung von bottom-up Information zuständige System soll vorwiegend rechtslateralisiert im temporoparietalen und ventralen frontalen Kortex liegen.

Die Diskussion über das fronto-parietale Netzwerk wird dadurch erschwert, dass die reine Aufmerksamkeitslenkungen nur mit großem Aufwand von anderem

Verhalten, wie beispielsweise dem Planen von Blickbewegungen, die Vorstellung eines antizipierten Stimulus oder die Repräsentation der durchzuführenden Aufgabe im Arbeitsgedächtnis zu trennen ist.

3.3 Einführung in die Magnetresonanztomographie (MRT)

In diesem Kapitel wird die fMRT beschrieben. Neben der Beschreibung der Rahmenbedingungen der Messung wird der Aufbau eines MRT⁴ grob dargestellt. Anschließend wird auf die physikalischen Grundlagen anatomischer und funktioneller Bildgebung eingegangen. Der Vorgehensweise bei der Auswertung anatomischer und funktioneller Daten werden weitere Abschnitte gewidmet. Anschließend werden Anwendungsfelder der fMRT bei der Untersuchung des visuellen Systems vorgestellt. Der letzte Abschnitt befasst sich mit der Kartierung der retinotopen Areale des visuellen Kortex.

3.3.1 MRT in der Forschungspraxis

Die MRT ermöglicht neben hochauflösenden anatomischen Aufnahmen des Körpers auch die indirekte Messung der Aktivität des Gehirns. Zu ihren positiven Eigenschaften gehört, dass zur Messung keine invasiven Eingriffe am Körper vorgenommen werden müssen. Es sind somit keine operativen Eingriffe oder Verabreichungen von Kontrastmitteln notwendig. Durch die wachsende Zahl der MRT in Forschungseinrichtungen und Kliniken zeichnet sich die Methode durch eine hohe Verfügbarkeit aus. Anstatt 2-dimensionale Schnittbilder aufzuzeichnen, werden 3-dimensionale Voxel variierbarer Größe aufgenommen. Mit MRT lassen sich fast alle Gewebearten durch unterschiedlich kontrastierte Bilder darstellen. Hinzukommt, dass zum jetzigen Zeitpunkt im Gegensatz zum Röntgen keine negativen Beeinflussungen des Gewebes belegt werden konnten. Die möglichen gesundheitlichen Risiken der MRT werden jedoch lebhaft diskutiert (Feychting, 2005; Leszczynski, 2005).

Die Probanden werden während der Experimente im MRT starken statischen Magnetfeldern und hochfrequenten Radiowellen ausgesetzt. Da der Körper jedoch keine Sensoren für Magnetfelder und Radiowellen besitzt, ist hiervon im Normalfall nichts spürbar. Jedoch können durch Bewegungen des

⁴ Die Abkürzung MRT wird sowohl für die Magnetresonanztomographie als auch für Magnetresonanztomographen verwendet.

Körpers im Magnetfeld elektrische Spannungen im Körper induziert werden, die in seltenen Fällen zur ungewollten Stimulation von Nervenzellen führen. Auch die hochfrequenten Radiowellen sind in der Lage, die Aktivität von Nervenzellen zu beeinflussen. In seltenen Fällen berichten Probanden von negativen Begleiterscheinungen der Untersuchung, die auf die genannten Ursachen rückführbar sind. Hierzu zählen unwillkürliche Bewegungen, Kribbeln im Körper, „Sternchen Sehen“ und Schwindel.

Bedingt durch das starke Magnetfeld des Scanners kann nicht jede beliebige Person an einer Messung teilnehmen. Implantate mit magnetischen Eigenschaften, Metallsplitter von Arbeitsunfällen oder Kriegsverletzungen, großflächige Tätowierungen mit eisenhaltigen Farbstoffen, Herzschrittmacher und andere elektrische Geräte, die am Körper getragen werden, gelten als Ausschlusskriterien einer Messung.

Probanden der Experimente müssen bereit sein, für einen Zeitraum von ein bis zwei Stunden unbewegt in der engen Röhre des Scanners zu liegen. Das auf Dauer unbequeme Liegen ist der wichtigste messzeitlimitierende Faktor der MRT. Je länger die Messungen andauern, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit von Bewegungen des Probanden.

Ein weiteres Problem der MRT ist der Lärm, der bei der Akquisition von anatomischen und funktionellen Aufnahmen entsteht. Die Probanden müssen aus Sicherheitsgründen Gehörschutz tragen, was die Kommunikation erschwert und Probleme bei Experimenten mit auditorischer Stimulation bereitet.

3.3.2 Komponenten eines MRT

In der MRT werden schwache elektromagnetische Signale gemessen. Dies kann nur in einer von der Außenwelt abgeschirmten Umgebung erfolgen. Die beiden Räume des Brain Imaging Centers (BIC) Frankfurt / Main, in denen sich die MRT befinden, wurden deshalb mit einer Kupferummantelung versehen. Neben der Abschottung gegen störende Signale von außen wird hierdurch auch die Beeinflussung externer elektrischer Geräte minimiert.

Ein typischer MRT (Abbildung 3) besteht aus vier wesentlichen Teilsystemen: dem Hauptfeldmagneten, dem Gradientensystem, dem Hochfrequenzsystem und dem zur Steuerung nötigen Computersystem.

Der Hauptfeldmagnet umschließt die Röhre, in die die Probanden während der Messung geschoben werden. In der Röhre wird ein statisches homogenes Magnetfeld erzeugt. Der Magnet ist die wichtigste und zugleich kostspieligste Komponente des MRT. Zurzeit werden vorwiegend supraleitende Elektromagnete mit Feldstärken zwischen 0.5 und 7 Tesla verwendet. Die im BIC in Frankfurt / Main verwendeten Kernspintomographen erzeugen eine magnetische Feldstärke von 3T. Dieses Magnetfeld ist etwa 60000mal stärker als das der Erde.

Richtungen innerhalb des MRT werden mit einem 3-dimensionalen kartesischen Koordinatensystem (xyz - Achse) beschrieben. Die z-Achse ist die Richtung des homogenen Magnetfelds.



Abbildung 3. 3T Siemens Trio MRT. Zur Messung müssen die Probanden auf der Liege Platz nehmen. Der Kopf wird in der Spule fixiert. Über einen Spiegel können den Probanden visuelle Stimuli dargeboten werden. Zu erkennen sind weiterhin der Gehörschutz, der bei der Messung getragen werden muss und der Alarmball mit dem die Probanden signalisieren können, dass die Messung abgebrochen werden soll.

Im Forschungsbereich ist ein Trend zu höheren magnetischen Feldstärken zu verzeichnen. Ein hohes Magnetfeld führt zu einem verbesserten Signal-Rauschverhältnis und somit zu erhöhter Bildqualität. Hierdurch werden kürzere Messzeiten und höhere räumliche Auflösungen möglich.

Während der Messungen werden gezielte Änderungen der magnetischen Feldstärke vorgenommen. Dies geschieht mittels des Gradientensystems. Für die drei Raumrichtungen x, y und z existieren separate Gradientenspulen, die über Gradientenverstärker angesteuert werden und innerhalb von Millisekunden das Hauptmagnetfeld beeinflussen können.

Das Hochfrequenzsystem des MRT erzeugt gepulste magnetische Hochfrequenzfelder. Innerhalb des MRT sind Antennen angebracht, in denen die gewünschten Impulse mittels Sendeverstärkern erzeugt werden und die resultierenden Signale gemessen werden.

Die vierte wesentliche Komponente eines MRT ist das zur Steuerung verwendete Computersystem. Über eine Bedienkonsole (Abbildung 4) werden neue Probanden registriert, die zur Messung verwendeten Stimulationssequenzen ausgewählt und die Parameter eingestellt. Um aus dem MR-Signal 3-dimensionale Bilder zu generieren, müssen mehrdimensionale Fouriertransformationen berechnet werden. Dies wird in der Regel von einem separaten Rechner bewältigt.



Abbildung 4. Kontrollraum des Siemens Trio MRT. Auf mehreren parallel arbeitenden Rechnern können die verwendeten Parameter der Sequenzen eingegeben werden. Weitere Apparaturen sind für die Stimuluspräsentation und die Answerfassung zuständig.

3.3.3 Physikalische Grundlagen

Die Probanden werden im MRT einem starken statischen Magnetfeld und hochfrequenten Radiowellen ausgesetzt. Hierbei werden messbare Reaktionen im Körper hervorgerufen. Die physikalischen Grundlagen dieses Prozesses werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Zuerst wird auf den Spin als Eigenschaft von Elementarteilchen eingegangen. Danach wird beschrieben, wie die Ausrichtung der Spins innerhalb des Magnetfelds des MRT gezielt verändert wird, um ein messbares Signal zu erhalten. Den Abschluss bildet die Beschreibung von Stimulationssequenzen.

Zurzeit werden hauptsächlich zwei Methoden zur Erzeugung des Signals der Spins verwendet. Es handelt sich hierbei um die Spinecho-Technik und die Gradientenecho-Technik. Der Einfachheit halber beschränkt sich dieser Abschnitt auf die Spinecho-Technik. Zur Vertiefung des Themas wird auf die Bücher von Köchli & Marineck (1998) und Siemens (2003) verwiesen.

3.3.3.1 Spin als grundlegende Eigenschaft von Elementarteilchen und dessen Nutzen für die MR-Bildgebung

Für die MR-Bildgebung werden Kerne von Wasserstoffatomen mittels Radiowellen angeregt. Wasserstoff ist das häufigste Element im menschlichen Körper und gleichzeitig für die Magnetresonanz sehr empfindlich. Ein Wasserstoffatom besitzt nur ein Proton, um das ein Elektron kreist. Das Proton ist positiv, das Elektron negativ geladen. Das Proton besitzt einen Spin. Der Spin eines Protons ist eine Grundeigenschaft von Elementarteilchen. Es dreht sich ständig um eine Rotationsachse. Der Spin verleiht dem Proton zwei wichtige Eigenschaften. Durch die ständige Drehung besitzt er einen Drehimpuls. Dies führt dazu, dass der Spin seine räumliche Rotationsachse ähnlich wie ein Kreisel beibehält.

Die zweite wichtige Eigenschaft des Protons ist, dass es sich ähnlich wie ein Stabmagnet verhält. Vergleichbar mit dem Magnetfeld der Erde, besitzt das Proton Nord- und Südpol, die auf der Rotationsachse liegen. Bewegt sich das Proton in einer Spule, dann erzeugt es darin eine Spannung. Wirkt ein Magnetfeld auf das Proton, richtet sich dessen Rotationsachse in Richtung der Feldlinien des äußeren Magnetfelds aus. Es erfolgt also eine Magnetisierung des Gewebes in z-Richtung des Scanners. Diese Ausrichtung der Rotationsachsen

der Spins entlang der Feldlinien des Hauptmagneten führt dazu, dass sich die vielen Richtungsvektoren der Magnetfelder der einzelnen Spins aufaddieren und die magnetische Feldstärke in z-Richtung leicht zunimmt. Diese nennt man Längsmagnetisierung oder longitudinale Magnetisierung.

Die Spins der Wasserstoffprotonen haben eine weitere Eigenschaft: Sie kreiseln. Wie ein Kreisel, der beim Drehen seine Rotationsachse bewegt, kreiseln auch die Rotationsachsen der Spins, wenn sich diese in einem Magnetfeld befinden. Dies nennt man Präzession. Die Geschwindigkeit, mit der der Spin eines Protons um die Feldrichtung des äußeren Magnetfeldes kreiselt, hängt von der Stärke des Magnetfelds ab. Je stärker das Magnetfeld des MRT, desto schneller kreiseln die Spins. Die Kreiselfrequenz eines Spins nennt man Larmorfrequenz.

Wenn die Spins innerhalb des Magnetfelds gleichphasig kreiseln, können die dabei entstehenden Signale in den Empfangsspulen der MRT gemessen werden. Dies ist jedoch normalerweise nicht der Fall. Die Signale der vielen ungeordnet kreiselnden Spins heben sich gegenseitig auf, so dass in xy-Richtung keine Änderungen des Magnetfelds beobachtbar sind.

Um Spins beobachten zu können, müssen sie gezielt aus ihrem magnetischen Gleichgewicht gebracht werden. Dies geschieht durch hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-Pulse), die im MRT für kurze Zeit erzeugt werden. Wenn die Spins entlang eines Magnetfeldes angeordnet sind und mittels eines HF-Pulses Kräfte auf sie einwirken, dann wird ihre Rotationsachse geneigt.

3.3.3.2 Manipulation der Ausrichtung der Spins im Kernspintomographen

Es wurde dargestellt, dass sich die Spins der Wasserstoffprotonen im statischen Magnetfeld des MRT in z-Richtung ausrichten. Die Präzession der Spins ist im Normalzustand nicht messbar, da die Spins ungeordnet kreiseln.

Mit HF-Pulsen können die Spins aus der z-Richtung ausgelenkt werden. Je nach Intensität lassen sich die Spins beispielsweise um 90° (also in xy-Richtung) oder um 180° entgegengesetzt zur z-Richtung auslenken. Der Winkel zwischen der alten und der neuen Ausrichtung wird Kippwinkel genannt.

Bei einem Kippwinkel von 90° entsteht eine Magnetisierung in xy-Richtung. Eine Besonderheit bei dieser Auslenkung ist, dass alle ausgelenkten Spins in

gleicher Richtung präzidieren. Ein 90° Puls bringt die Phasen der einzelnen Spins in Gleichklang. Nachdem der HF-Puls beendet ist, richten sich die Spins wieder in z-Richtung aus. Da sie nun jedoch phasenkohärent präzidieren, ist in xy-Richtung eine, sich aus der Summe der Spinvektoren ergebende, Quermagnetisierung (oder auch transversale Magnetisierung) messbar, die mit der Larmorfrequenz rotiert. Die phasenkohärente Präzession induziert in den Empfangsspulen des MRT eine Spannung und ist somit messbar.

3.3.3.3 Transversale und longitudinale Relaxation

Es wurde beschrieben, dass es zur Längsmagnetisierung kommt, wenn sich die Spins innerhalb des MRT in Richtung des statischen Magnetfelds anordnen. Mithilfe des Senders des MRT ist es möglich, die Rotationsachsen eines Großteils der Spins gezielt um 90° auszulenken. Dies führt dazu, dass das durch Längsmagnetisierung entstandene Magnetfeld schwächer wird. Da sich die einzelnen Magnetfelder der Spins nun in xy-Richtung aufaddieren, entsteht eine transversale Magnetisierung. Dieser Zustand bleibt jedoch nur kurzzeitig bestehen. Nach Beendigung des HF-Pulses bewirken zwei voneinander unabhängige Prozesse, dass die Spins sich wieder nach dem Magnetfeld des MRT ausrichten.

Der erste Prozess wird als longitudinale Relaxation bezeichnet. Die 90° ausgelenkten Spins drehen sich wieder zurück in die Richtung des Magnetfelds des MRT. Die transversale Magnetisierung der Spins nimmt hierbei ab, während die Längsmagnetisierung langsam wieder zunimmt. Je nach Stärke des Magnetfelds und nach Gewebeart findet das Zurückkippen in einem anderen Zeitfenster statt. Die individuelle Zeitkonstante für den Vorgang ist T_1 . T_1 liegt zwischen einer halben und mehreren Sekunden.

Der zweite Prozess wird transversale Relaxation genannt. Kurz nachdem die Spins durch den Sender in die x/y Ebene gekippt wurden, kreiseln sie phasenkohärent. Wartet man etwas länger, beginnen die Spins, sich wieder in verschiedenen Phasen zu drehen. Das transversale Magnetfeld nimmt dabei ab, da sich die einzelnen Magnetfelder der Spins nicht mehr aufaddieren sondern teilweise ausgleichen. Die transversale Relaxation ist also der Verlust der transversalen Magnetisierung durch Außerphasegeraten der Spins. Die theoretische Zeitkonstante dieses Vorgangs ist T_2 . Die tatsächliche transversale

Relaxation erfolgt schneller, da auch Magnetfeldinhomogenitäten des MRT und störende Einflüsse des benachbarten Gewebes zur Dephasierung der Spins beitragen. Die wirkliche Zeit für den Abbau der transversalen Magnetisierung wird deshalb als $T2^*$ bezeichnet und beträgt 100 – 200 ms.

Das transversale Magnetfeld zerfällt somit schneller als sich das Längsmagnetfeld wieder aufbaut ($T2 < T1$). Bei der Auswertung des MR-Signals lassen sich die $T1$ - und die $T2$ - Relaxation unterschiedlich für die Erzeugung der Bilder gewichten. Je nachdem, welche Relaxationsart vorwiegend betrachtet wird, spricht man von $T1$ - oder $T2$ -gewichteten Bildern.

3.3.3.4 Repetitionszeit TR und die T1 Gewichtung

Es wurde beschrieben, dass transversale und longitudinale Relaxation voneinander unabhängige Prozesse sind. Die transversale Relaxation findet grundsätzlich schneller statt als die longitudinale. Dies ermöglicht die Aufnahme unterschiedlich gewichteter Bilder.

Bei einer einfachen Anregung der Spins werden nicht alle möglichen Spins ausgelenkt. Dies ist der Grund, wieso die Spins in speziellen Sequenzen teilweise mehrfach in Folge durch HF-Pulse angeregt werden. Die Zeit, die zwischen zwei aufeinander folgenden Anregungen derselben Spins verstreicht, nennt man Repetitionszeit (TR). Die TR kann zu Beginn einer Messung in der Bedienkonsole des MRT eingestellt werden. Die TR beeinflusst den $T1$ Kontrast sehr stark. Je länger man den Spins Zeit lässt, um wieder Längsmagnetisierung aufzubauen, desto mehr Spins tun dies. Da in der Summe eine größere Anzahl Spins ausgelenkt wird, ist das bei der Relaxation entstehende Signal umso stärker, je größer die TR gewählt wird.

Verschiedene Gewebearten zeigen unterschiedliche Relaxationszeiten. Deshalb erscheinen sie auf den aufgenommenen Bildern unterschiedlich hell. Fettgewebe besitzt beispielsweise eine kurze $T1$ während Wasser ein langes $T1$ besitzt. Wählt man die Repetitionszeit sehr kurz (ca. 600 ms), erscheint Gewebe mit langem $T1$ sehr dunkel, während Gewebe mit kurzem $T1$ sehr hell aussieht. $T1$ liefert in diesem Fall viel Information für das Bild und man spricht von $T1$ gewichteten Bildern. Wählt man die Repetitionszeit sehr lang, haben auch Gewebe mit langem $T1$ mehr Zeit, um sich zu längsmagnetisieren. Die $T1$ Relaxation trägt in diesem Fall nur noch wenig zum Bildkontrast bei.

3.3.3.5 Echozeit TE und T2 Gewichtung

Die Echozeit (TE) ist die Zeit, die man von der Anregung der Spins durch den HF-Puls bis zur Signalmessung vergehen lässt. TE bestimmt den Einfluss auf den T2 Bildkontrast. Gewebe mit kurzem T2 (z.B. Fett) erscheint bei langem TE dunkel. Gewebe mit langem T2 (z.B. Wasser) erscheint bei langem TE hell. Kurzes TE führt zu geringer T2 Gewichtung. Eine lange TE führt zu großer T2 Gewichtung.

3.3.3.6 Sequenzen

In den vorherigen Abschnitten ist beschrieben worden, dass die Rotationsachse der Spins der Wasserstoffprotone, die sich entlang der Feldlinien des MRT ausgerichtet haben, durch HF-Pulse gezielt ausgelenkt werden. Anschließend zerfällt nach T2* die transversale Magnetisierung und nach T1 baut sich die longitudinale Magnetisierung wieder auf.

Die tatsächliche Messung der MR-Signale ist jedoch noch komplexer als es bis jetzt dargestellt wurde. Die Larmorfrequenz der Spins ist von der Feldstärke des MRT und vom untersuchten Gewebe abhängig. Bei einem homogenen Magnetfeld würden alle Spins des untersuchten Volumens, deren Larmorfrequenz dem HF-Puls entspricht, durch diesen ausgelenkt. Man könnte in diesem Fall nicht feststellen, an welchem Ort sich die Spins befinden. Um die Signale der Spins lokalisieren zu können, wird die magnetische Feldstärke des Scanners gezielt durch Erzeugung von Gradienten verändert. Da nun an verschiedenen Orten des untersuchten Volumens unterschiedliche magnetische Feldstärken herrschen, besitzen die Spins einer Gewebesorte abhängig von ihrem Ort unterschiedliche Larmorfrequenzen. Auf diese Weise lassen sich der Ort und die Größe des betrachteten Gebiets verändern.

Es wird deutlich, dass es sehr aufwendig ist, die Spinsignale aller Orte eines untersuchten Volumens messen zu können. Es reicht nicht aus, einen einzigen HF-Puls zu senden und das resultierende Signal zu messen. Damit der Entstehungsort des gemessenen Signals bestimmt werden kann, muss das Magnetfeld, in dem sich das untersuchte Gewebe befindet, systematisch verändert werden. Hiervon bekommt man als bloßer Anwender jedoch nichts mit. Jeder MRT ist mit einer Sammlung vorgefertigter Stimulationssequenzen

ausgestattet, die für verschiedene Fragestellungen optimiert sind. Die Sequenzen bestehen in der Regel aus mehreren tausend Zeilen Programmcode.

In den in dieser Arbeit durchgeführten Studien wurden zwei unterschiedlich optimierte Sequenzen verwendet. Die MP_rage Sequenz war für hochauflösende anatomische Messungen optimiert, während sich die EPI Sequenz besonders gut für die indirekte Messung der Aktivität im Gehirn eignet.

3.3.4 Anatomische Bildgebung

In diesem Kapitel wird auf die Aufnahmen und die computergestützte Aufbereitung anatomischer Bilder eingegangen.

3.3.4.1 Aufnahme anatomischer Bilder

Während anatomischer Aufnahmen werden die Probanden gebeten, die Augen zu schließen und ruhig in der Röhre des MRT liegen zu bleiben. Je nach verwendeter Sequenz dauert eine Aufnahme zwischen 1 und 30 Minuten. Die Messzeit der in dieser Arbeit verwendeten MP_rage Sequenz betrug ca. 8 Minuten. Die Zeit reichte aus, um den gesamten Kopf des Probanden mit einer Auflösung von 1mm^3 pro Voxel aufzunehmen (Abbildung 5A).

Um das Signal-Rauschverhältnis zu erhöhen, kann ein anatomisches Volumen mehrfach bei einem Probanden gemessen werden, um es anschließend zu mitteln.

Das Ergebnis der Messung ist ein hochauflösender 3-dimensionaler Datensatz. Jeder aufgenommene Voxel repräsentiert einen Helligkeitswert. Je nachdem, wie die Parameter der verwendeten Sequenz gewählt wurden, unterscheiden sich die Gewebearten anhand ihrer Helligkeit. Die Qualität der Aufnahmen ist stark von den Bewegungen des Probanden abhängig. Je ruhiger der Proband liegen bleibt, desto „schärfer“ ist der Gesamteindruck der Aufnahme. Ein weiterer limitierender Faktor ist die Homogenität des Magnetfeldes des MRT. Technisch ist es unmöglich, ein absolut homogenes Magnetfeld herzustellen. Die Inhomogenität des Magnetfeldes wird bei anatomischen Aufnahmen als Hell-Dunkel-Verlauf innerhalb des Bildes sichtbar. Somit muss hingenommen werden, dass manche Bereiche des Bildes heller erscheinen als andere.

3.3.4.2 Computergestützte Aufbereitung der Messung

Ein erster Schritt bei der computergestützten Aufbereitung anatomischer Aufnahmen besteht in der Wahl der gewünschten Helligkeit und des Kontrasts des Bildes. Falls in der Aufnahme die charakteristischen durch Magnetfeldinhomogenitäten bedingten Hell-Dunkel-Verläufe zu erkennen sind, kann dies durch eine Inhomogenitätskorrektur verringert werden (Abbildung 5B).

Anschließend erfolgt die Auswahl des für die weiteren Berechnungen gewünschten Bereichs des Kopfes. Hierbei wird das Rauschen von außerhalb des Kopfes aufgenommenen Voxeln gelöscht.

Es ist selbstverständlich, dass sich die Position des Kopfes eines Probanden bei jeder Messung im Scanner ändert. Um Daten eines Probanden, die in verschiedenen Sitzungen aufgenommen wurden, vergleichen zu können, muss jede Aufnahme nach einem standardisierten Verfahren ausgerichtet werden. Dies geschieht durch die Rotation des aufgenommenen Kopfes entlang der AC-PC Linie. Die anteriore und die posteriore Kommissur sind im Gehirn einfach zu lokalisierende Orte.

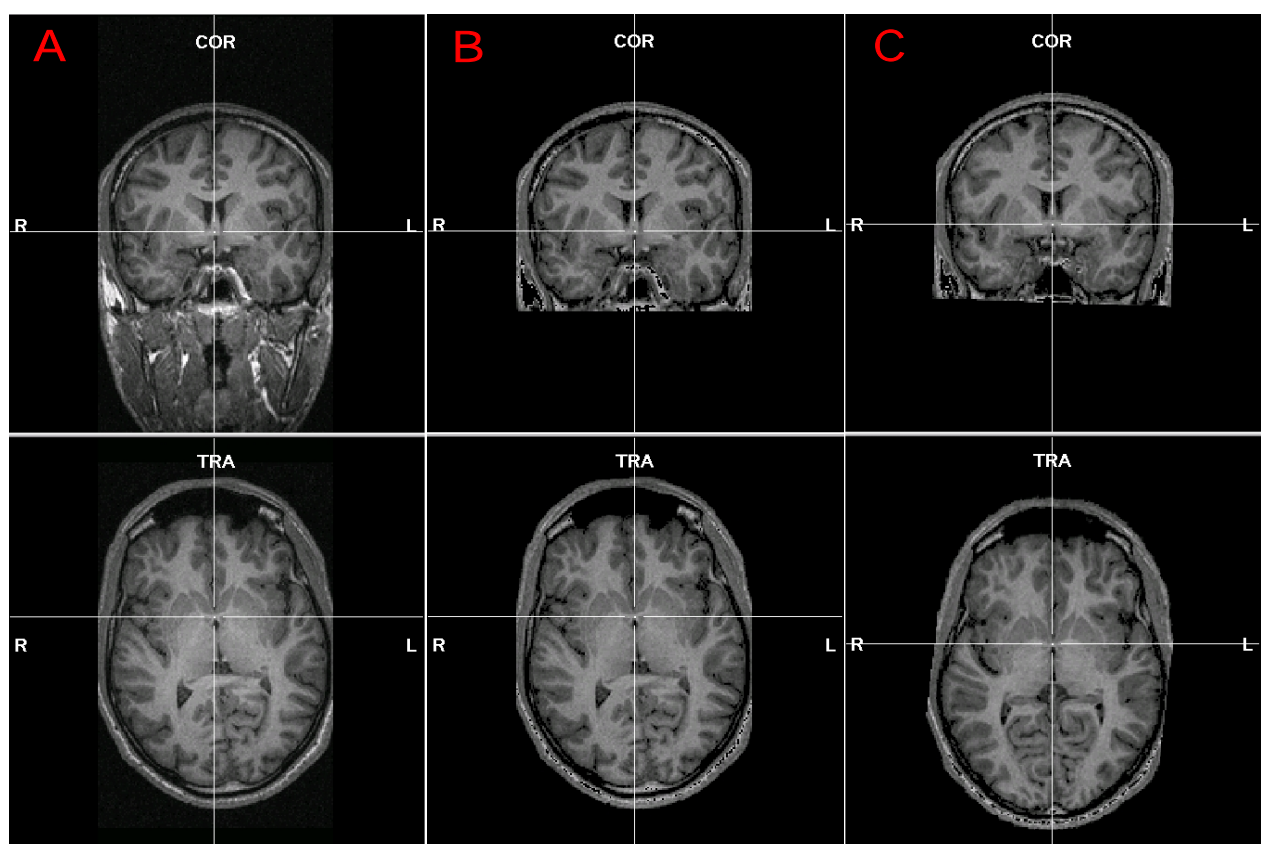


Abbildung 5. Aufbereitung eines anatomischen Datensatzes. Die linke Spalte (A) zeigt den nichtkorrigierten Rohdatensatz. Die mittlere Spalte (B) zeigt den Datensatz nach der Inhomogenitätskorrektur und der Auswahl der relevanten Bereiche des Gehirns. Die rechte Spalte (C) zeigt den AC-PC rotierten in den Talairachraum transformierten Datensatz.

Es wird eine gedachte Linie durch diese beiden Punkte im Gehirn gezogen. Anschließend wird der Kopf des Probanden rechnerisch derart rotiert, dass sich die Linie in der Horizontalen befindet. Nachdem alle Messungen eines Probanden entlang der AC-PC Linie rotiert wurden, können diese übereinander gelegt werden.

Der Vergleich der Messungen verschiedener Probanden wird dadurch erschwert, dass sich die Größen der Gehirne unterscheiden. Aus diesem Grund wird jede gewonnene Aufnahme an die Größe des von Talairach & Tournoux (1988) festgelegten Standardgehirns angepasst. Dieser Verarbeitungsschritt wird Talairachisierung genannt (Abbildung 5C).

Zur Kartierung der retinotopen Areale wird eine Rekonstruktion des Kortex jedes Probanden benötigt (Dale, Fischl, & Sereno, 1999). Hierzu muss am Rechner die helle von der dunklen Substanz des Gehirns getrennt werden. Für diesen Arbeitsschritt existieren automatisierte Funktionen. Jedoch ist das Ergebnis einer automatischen Segmentierung stark von der Qualität der anatomischen Aufnahme abhängig. In der Regel müssen hierbei von Hand Korrekturen durchgeführt werden. Eine korrigierte Rekonstruktion des Kortex kann nun für weitere Berechnungen verwendet werden. Eine gängige Methode ist das simulierte Aufblasen einer Großhirnhemisphäre. Dies ermöglicht es, den normalerweise stark gefalteten Kortex in eine glatte Fläche umzuwandeln.

Aufgeblasene Kortexrekonstruktionen können anschließend auf eine 2-dimensionale Fläche projiziert werden (Abbildung 6). Das Ergebnis wird als Flatmap bezeichnet (Fischl, Sereno, & Dale, 1999).

Die Darstellung der Aufbereitung anatomischer Aufnahmen zeigt, wie viele Arbeitsschritte hierzu notwendig sind. Die wenigsten Arbeitsschritte laufen vollständig automatisiert ab. Je nachdem, wie der Anwender die Parameter wählt, sind leicht unterschiedliche Ergebnisse der Aufbereitung zu erwarten. Zum jetzigen Zeitpunkt lässt sich diese erhebliche Anzahl an Freiheitsgraden bei der Auswertung jedoch nicht einschränken. Hinzu kommt, dass die Aufbereitung einer anatomischen Aufnahme recht zeitaufwendig ist. Auf einem gebräuchlichen PC muss je nach Übung des Anwenders bis zu 1 Arbeitstag pro anatomischer Aufnahme eingeplant werden.

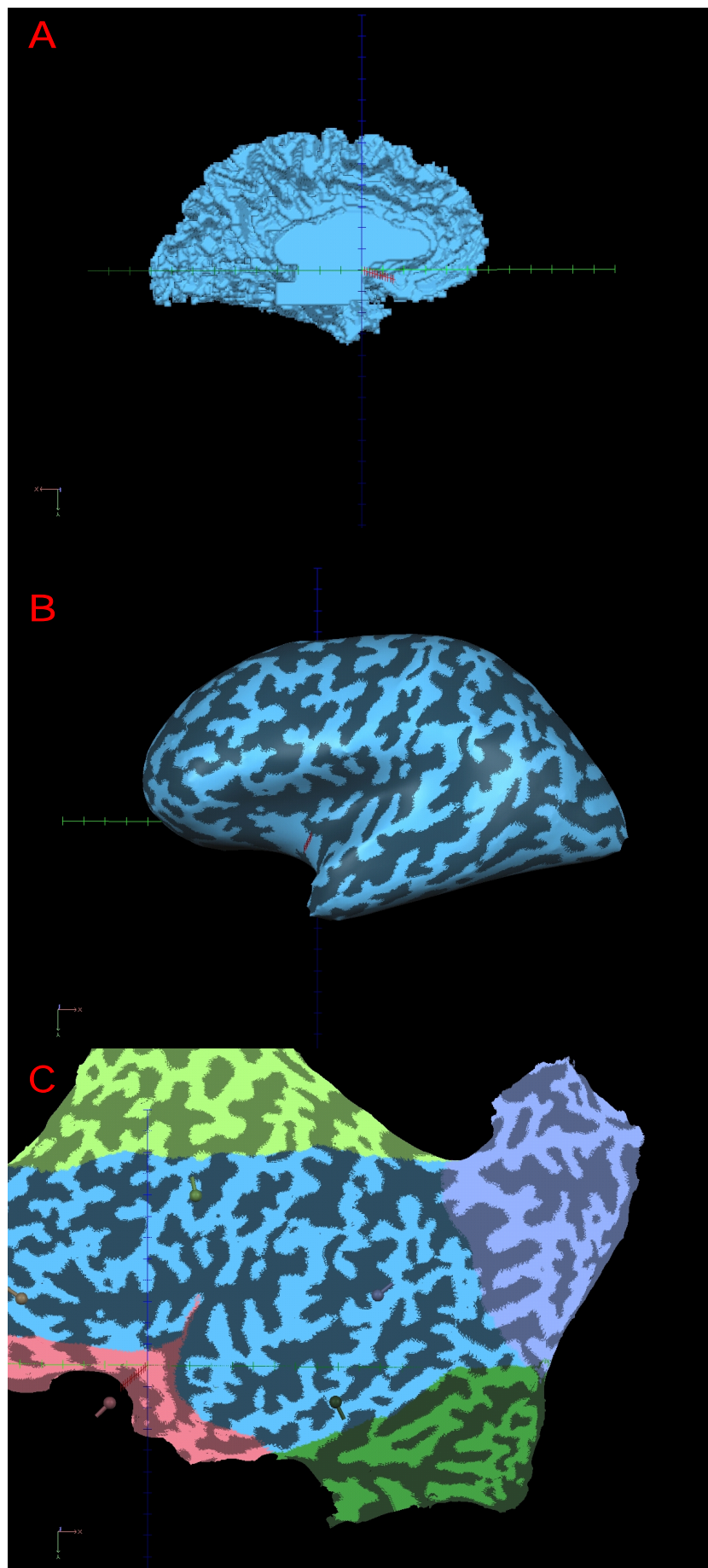


Abbildung 6. Rekonstruktion einer Großhirnhälfte. Nach der Trennung von weißer und grauer Substanz, kann eine Kortexrepräsentation berechnet werden (A). Im Anschluss erfolgt das simulierte Aufblasen der Kortexrekonstruktion (B). Gyri sind in der Abbildung hell dargestellt, während Sulci dunkel erscheinen. Nun kann die aufgeblasene Kortexrekonstruktion aufgeschnitten und aufgefaltet werden (C). Der rechte Rand der Abbildung zeigt die Kortexhälften, die sich oberhalb und unterhalb der Calcarina befanden.

3.3.5 Funktionelle Bildgebung

Leider ist es zurzeit unmöglich, neuronale Aktivität mittels MRT direkt zu messen. Es ist jedoch ein Verfahren entwickelt worden, das die indirekte Messung der Aktivität zulässt (Turner, Howseman, Rees, Josephs, & Friston, 1998).

Mittels fMRT kann die „blood oxygenation level dependent“ (BOLD)⁵ erfasst werden. Die BOLD Antwort wird im nächsten Abschnitt vorgestellt. Anschließend werden die Eigenschaften der echoplanaren Bildgebung (EPI) erläutert. Die letzten beiden Abschnitte befassen sich mit der computergestützten Aufbereitung und der statistischen Auswertung der funktionellen Daten.

3.3.5.1 Die BOLD Antwort als indirektes Maß für die neuronale Aktivität

In fMRT Messungen wird die BOLD Antwort erfasst. Der Grundgedanke der Messung beruht auf der Feststellung, dass neuronale Aktivität von einer erhöhten Durchblutung des aktiven Gewebes gefolgt wird. Dies verursacht Veränderungen im lokalen Sauerstoffgehalt des Bluts. Sauerstoffreiches und sauerstoffarmes Blut besitzen unterschiedliche magnetische Eigenschaften.

Die genaue Herkunft des BOLD-Signals bis heute ein umstrittenes Thema (Toronov et al., 2003). Es wurden viele Variablen bestimmt, die einen Einfluss auf die BOLD-Antwort besitzen. Einige dieser Variablen sind der Blutfluss (regional cerebral blood flow), das Blutvolumen (regional cerebral blood volume), der Anteil sauerstoffhaltigen Blutes (regional cerebral blood oxygenation) und die metabolische Rate (cerebral oxygen metabolic rate).

Toronov et al. (2001) untersuchten den Zusammenhang zwischen Blutvolumen, Veränderungen der Deoxyhämoglobinkonzentration und dem BOLD-Signal. Es wurden die Messergebnisse von fMRT und near-infrared spectroscopy (NIRS) verglichen. NIRS ist ein nichtinvasives Verfahren zur Bestimmung des Blutflusses. Es zeigte sich, dass das BOLD Signal bei motorischer Aktivierung hauptsächlich durch die Veränderung der Konzentration des Deoxyhämoglobins verursacht wird. Es konnte zwar auch ein Einfluss des regionalen Blutvolumens nachgewiesen werden, dieser Effekt war jedoch viel geringer als der der Veränderung der Deoxyhämoglobinkonzentration. Die

⁵ Synonyme Begriffe für BOLD sind BOLD-Signal und BOLD-Antwort

Konzentrationsänderung des Deoxyhämoglobins scheint hauptsächlich durch eine Beschleunigung des regionalen Blutflusses verursacht zu werden. Die Blutgefäße scheinen sich hierbei kaum auszudehnen.

Die beobachtbaren Änderungen des BOLD Signals wachsen mit der Stärke des Magnetfelds des MRT. Die beobachtbaren Intensitätsschwankungen bei einer magnetischen Feldstärke von 1,5 Tesla werden auf maximal 4% geschätzt (Turner et al., 1998).

Der Zusammenhang zwischen neuronaler Aktivität und der Veränderung des Blutflusses wird durch die hämodynamische Antwortfunktion beschrieben. Die Veränderung des Blutflusses beginnt etwa 2 s nach der Veränderung der neuronalen Aktivität und erreicht erst nach 8-12 s ihr Maximum, um anschließend wieder zum Ausgangswert zurückzukehren (Logothetis, 2003).

3.3.5.2 Echoplanare Bildgebung (EPI)

Um die BOLD Antwort zu messen, werden zumeist EPI⁶ Sequenzen verwendet. EPI ist eines der zurzeit schnellsten Verfahren. Ein einziges Schichtbild des Gehirns kann in ca. 50-100 ms aufgenommen werden (Siemens, 2003). Dies ermöglicht es, das gesamte Gehirnvolumen bei einer Auflösung von 3 mm³ pro Voxel in ca. 1-3 s zu erfassen.

Bei der Messung eines Schichtbilds wird nur ein einziger Anregungspuls in den HF-Spulen erzeugt. Anschließend werden die Gradientenspulen mehrfach umgeschaltet, um mehrere Echos aufnehmen zu können. Durch die Wahl extrem kurzer Echozeiten sind die gewonnenen Aufnahmen T2* gewichtet.

EPI Sequenzen sind anfällig für Inhomogenitäten des Magnetfelds. Durch das schnelle Schalten der Gradientenspulen werden zusätzliche Feldinhomogenitäten erzeugt, deren Auswirkungen sich überlagern und zu geometrischen Verzerrungen der Aufnahme führen können.

Weiterhin erzeugt das schnelle Schalten der Gradientenspulen Lärm. Die Probanden müssen deshalb während der Untersuchung Gehörschutz tragen. Die Verwendung von EPI Sequenzen ermöglicht es, die BOLD Antwort jedes Voxels im Gehirn in kurzen sich wiederholenden Abständen aufzuzeichnen.

⁶ echoplanar imaging

3.3.5.3 Aufbereitung funktioneller Datensätze

Turner et al. (1998) beschreiben das prinzipielle Vorgehen bei der Aufbereitung funktioneller Datensätze. Ähnlich wie bei der Aufbereitung anatomischer Datensätze sind etliche Zwischenschritte notwendig, die nicht vollautomatisch durchgeführt werden können. Häufig muss per Hand mit einer erheblichen Anzahl von Freiheitsgraden in die Aufbereitung eingegriffen werden.

Die Dauer funktioneller Messungen übersteigt meist die der anatomischen Messungen. Es ist zu erwarten, dass sich die Probanden im Verlauf einer Messung im MRT bewegen. Um Bewegungsartefakte zu minimieren, wurden Algorithmen zur Bewegungskorrektur entwickelt, die standardmäßig auf jede funktionelle Messung angewendet werden. Neben der Korrektur der Bewegung liefern die Algorithmen Information über die Richtung der Bewegung und deren Zeitverlauf. Häufig dient der Umfang der Bewegung eines Probanden als Ausschlusskriterium für Messungen. Weiterhin kann geprüft werden, ob die Bewegung des Probanden systematisch mit der experimentellen Bedingung variiert.

Da die Messung der verschiedenen Schichten eines Volumens nicht zeitgleich erfolgt, ist die Anpassung der Messzeitpunkte der Schichten ein weiteres standardisiertes Verfahren.

Zusätzlich zu Messfehlern des MRT wird die Signalqualität durch weitere Faktoren wie der Erwärmung des Geräts bei der Messung, globale Veränderungen des Sauerstoffgehalts des Bluts und andere durch Pulsschlag und Atmung entstehende Einflüsse beeinträchtigt. Um diese Einflüsse zu reduzieren, werden lineare Drifts und oszillatorische Anteile im Signal, die sich langsamer als die experimentellen Bedingungen verändern, aus der Messung entfernt.

Im Anschluss an die Aufbereitung des Datensatzes werden die anatomischen und funktionellen Daten zusammengefasst. Die Schichtbilder der funktionellen Messung werden auf eine 3-dimensionale Repräsentation des Gehirns projiziert, die exakt auf die 3-dimensionale Darstellung des AC-PC transformierten talairachisierten Gehirns passt. Dies ermöglicht es, sich den Zeitverlauf der BOLD Signals eines Voxels in der 3-dimensionalen Darstellung anzeigen zu lassen.

3.3.5.4 Statistische Auswertung funktioneller Daten

Während einer funktionellen Messung werden in der Regel mehrere Hundert Schichtbildaufnahmen des gesamten Gehirns erfasst. Die Bilder enthalten einen Helligkeitswert für jeden aufgenommenen Voxel. Neuronale Aktivitätsänderungen in einem Voxel des Gehirns gehen mit der Veränderung der Helligkeit des Voxels einher. Die mittlere Helligkeit einer MR-Aufnahme wird vom MRT bei jeder Messung unterschiedlich festgelegt. Um die Befunde verschiedener funktioneller Messungen vergleichen zu können, ist es somit nicht zulässig, die Helligkeitswerte direkt zum Vergleich zu verwenden. Aus diesem Grund wird bei jeder Messung eine experimentelle Bedingung als Referenzbedingung (Baseline) definiert. Anschließend wird für jeden Voxel die Abweichung einer experimentellen Bedingung im Vergleich zur Referenzbedingung berechnet. Mittels statistischer Methoden kann nun geprüft werden, ob die Abweichung zur Referenzbedingung systematisch mit der Änderung der experimentellen Bedingung variieren.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis einer statistischen Auswertung. In einem Experiment musste ein Proband die Bildschirmmitte fixieren. Im Wechsel von 20 s wurden flackernde Schachbrettmuster oder ein schwarzer Bildschirm gezeigt. Anschließend wurde berechnet, an welchen Orten im Gehirn die BOLD Antwort beim Betrachten der Schachbrettmuster größer ist als beim Betrachten des schwarzen Bildschirms. Der Grad des Zusammenhangs der Veränderung der experimentellen Bedingung und der Veränderung des BOLD Signals ist in Falschfarben dargestellt. Die BOLD Antwort der anderen Voxel variierte nicht systematisch mit der experimentellen Bedingung.

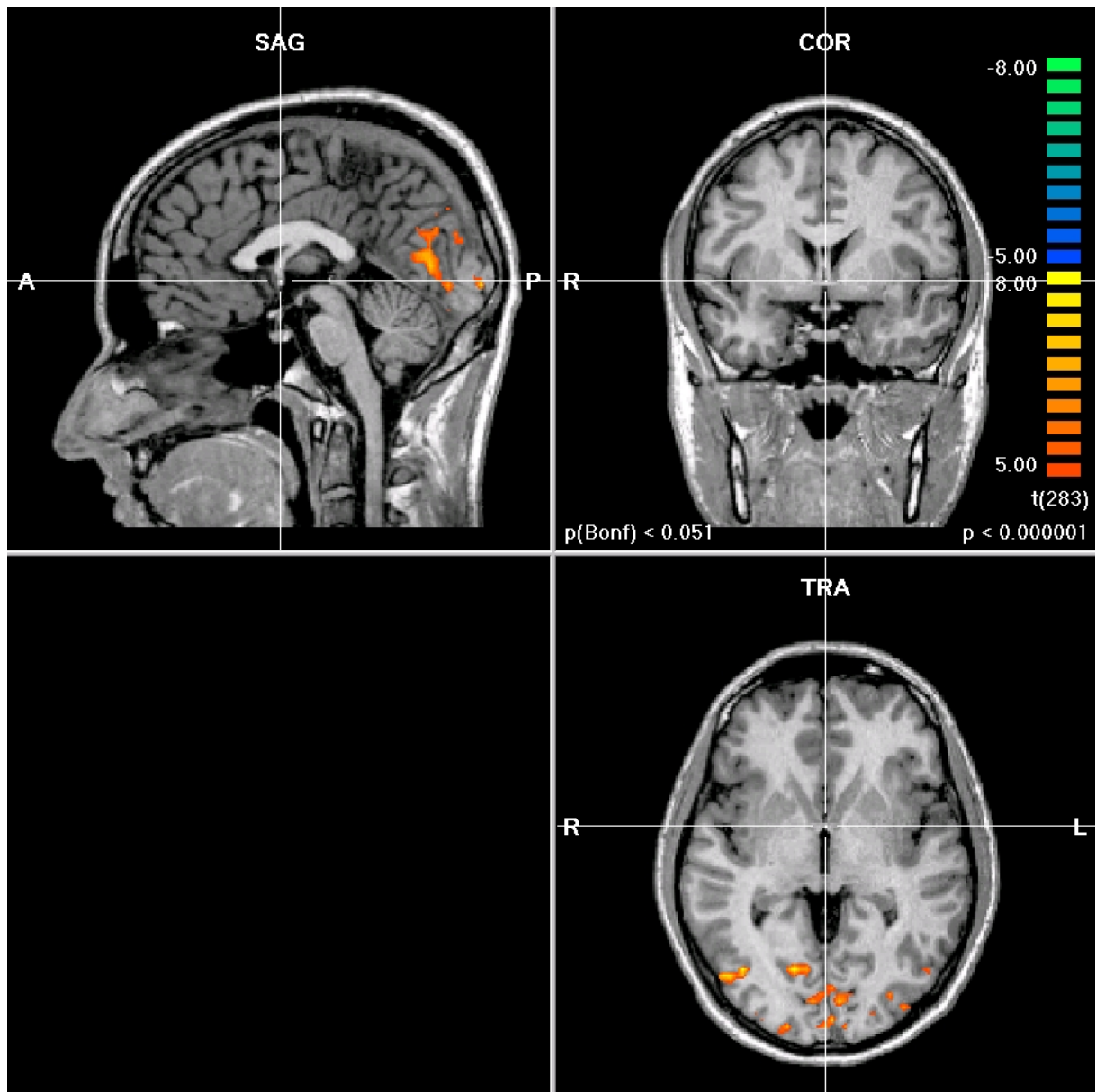


Abbildung 7. Auswertung eines Stimulationsexperiments. Die Voxel der fMRT Aufnahme, deren Aktivität sich während der Betrachtung von flackernden Stimuli signifikant von der Fixation eines leeren Bildschirms unterscheiden, wurden eingefärbt. Aus dem Farbton werden Größe und Richtung des Zusammenhangs ersichtlich. Als bonferronikorrigiertes Signifikanzniveau wurde $p < 0.051$ gewählt.

3.3.6 Retinotopes Mapping

Unter retinotopem Mapping versteht man eine Messmethode, mit der sich unter anderem die Grenzen der frühen retinotop organisierten visuellen Areale des Kortex bestimmen lassen. Während dies früher nur mittels invasiver Methoden zu bewerkstelligen war, bietet fMRT heute eine qualitativ ebenbürtige nichtinvasive Methode (Serenio et al., 1995).

Ein wesentlicher Unterschied zu klassischen funktionellen Messungen besteht darin, dass beim retinotopen Mapping ausschließlich die Aktivität des visuellen Kortex betrachtet wird. Die graue Substanz ist beim Menschen stark gefaltet, was eine direkte Betrachtung 3-dimensionaler fMRT Daten erschwert. Um die gewonnenen 3-dimensionalen Informationen über die retinotopen Areale besser interpretieren zu können, ist es sinnvoll, die 3-dimensionale Information in ein 2-dimensionales Koordinatensystem zu übertragen.

Die Bestimmung der retinotopen Kartierung ist zumeist nur ein Zwischenschritt der Auswertung von fMRT Daten. Werden beispielsweise Objekte an unterschiedlichen Orten im Sehfeld dargeboten, kann mittels retinotoper Kartierung festgestellt werden, in welchen visuellen Arealen Unterschiede hinsichtlich der Verarbeitung der Reize zu beobachten sind.

Warnking et al. (2002) veröffentlichten eine Übersichtsarbeit zum retinotopen Mapping, in der die einzelnen Durchführungsschritte der Methode beschrieben sind.

An jedem Proband müssen eine funktionelle und eine anatomische Messung durchgeführt werden. Die anatomische Messung wird als Grundlage zur Segmentierung des Kortex benötigt. Nach der simulierten Trennung von weißer und grauer Substanz können eine aufgeblasene Kortexrepräsentation und die hierauf basierende Flatmap berechnet werden. Dies ermöglicht die Übertragung der statistischen Auswertung der funktionellen Messung auf eine 2-dimensionale Karte.

Während der funktionellen Messung müssen die Versuchspersonen einen Fixationspunkt auf dem Bildschirm betrachten und dürfen ihre Augen nicht bewegen. Gleichzeitig werden flackernde Schachbrettmuster als Stimuli dargeboten, die im visuellen Kortex messbare Intensitätsänderungen des BOLD Signals erzeugen sollen, um die Berechnung der Grenzen der visuellen Areale zu ermöglichen.

Durch die abwechselnde Darbietung von flackernden Schachbrettmustern (Abbildung 8) auf dem horizontalen und dem vertikalen Meridian lassen sich die Grenzen der visuellen Areale V1, V2, V3/ VP bestimmen. Da die retinotopische Organisation in den höheren visuellen Arealen immer weniger ausgeprägt ist und die Kortexfläche der Areale gleichzeitig sinkt, lassen sich die höheren Areale nur mit aufwendigeren Verfahren hinreichend gut bestimmen (Engel et al., 1997; Olman, Ronen, Ugurbil, & Kim, 2003).

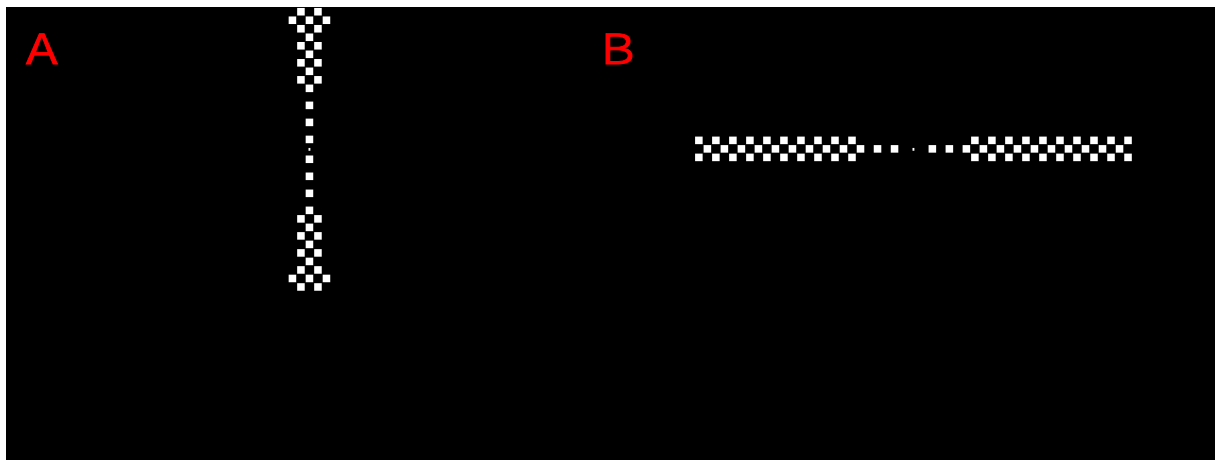


Abbildung 8. Um die Grenzen der frühen visuellen Areale im Kortex bestimmen zu können, werden flackernde Schachbrettmuster auf dem vertikalen (A) und dem horizontalen (B) Meridian des Sehfelds dargeboten.

3.4 fMRT Studien zur visuellen Aufmerksamkeit

Nachdem das Spotlight Modell, die Anatomie des visuellen Systems und Grundlagen der fMRT in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurden, werden nun mittels fMRT gewonnene Erkenntnisse zur visuellen Aufmerksamkeit dargestellt. Sowohl für das Spotlight Modell als auch für das Modell der Zoom Lens konnten physiologische Korrelate gefunden werden. Weiterhin scheint das Spotlight nicht teilbar zu sein und es soll eine Suppressionszone um das Spotlight existieren.

Es zeigt sich, dass die mittels fMRT gesammelten Befunde sehr gut mit den aus Verhaltensdaten und anderen physiologischen Messmethoden gewonnenen Schlussfolgerungen übereinstimmen.

3.4.1 Ein physiologisches Korrelat des Spotlights

Brefczynski & DeYoe (1999) führten ein fMRT Experiment durch, um zu prüfen, ob sich ein neuronales Korrelat des Spotlights der Aufmerksamkeit finden lässt. Die Probanden mussten während der Experimente einen Fixationspunkt betrachten und durften ihre Augen nicht bewegen. Anschließend wurden sie über Hinweisreize instruiert, ihre Aufmerksamkeit auf verschiedene Orte im Sehfeld zu richten. Hierbei wurde die BOLD Antwort in den neuronalen Repräsentationen der Orte im Sehfeld gemessen.

In einem weiteren Teil des Experiments sollten die Probanden sowohl ihre Aufmerksamkeit als auch den Blick auf den Fixationsort richten. Hierbei wurden Stimuli an dem zuvor beobachteten Orten dargeboten. Es zeigte sich, dass das Verschieben von Aufmerksamkeit exakt in denselben Regionen des visuellen Kortex zu Aktivitätszunahmen führte, die auch bei der Präsentation der Stimuli aktiv waren.

Diese Befunde wurden als physiologisches Korrelat der Spotlights der visuellen Aufmerksamkeit interpretiert. Das Verschieben von Aufmerksamkeit an einen Ort im Sehfeld geht mit einer erhöhten Aktivität der neuronalen Repräsentationen des beobachteten Orts einher. Die durch Aufmerksamkeitsverschiebungen hervorgerufene Änderung der Aktivität wurde in den visuellen Arealen V1, V2, V3, VP und V4 gefunden. Die Studie stützt weiterhin die

Vermutung, dass Aufmerksamkeit in frühen visuellen Arealen retinotop organisiert ist (Tootell et al., 1998).

Smith, Singh & Greenlee (2000) berichteten ebenfalls von einer fMRT Studie zur Aufmerksamkeitsmodulation im visuellen Kortex. Zusätzlich zur beschriebenen Aktivitätszunahme der neuronalen Repräsentationen der beobachteten Orte konnte gezeigt werden, dass die Aktivität aller unbeachteten Orte sinkt. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass räumliche visuelle Aufmerksamkeitsverschiebungen die Grundaktivität des gesamten retinotopen Kortex beeinflussen.

Auch Somers, Dale, Seiffert & Tootell (1999) führten eine fMRT Studie zur visuellen Aufmerksamkeitssteuerung durch. In Übereinstimmung mit den berichteten Befunden konnten die aufmerksamkeitsbedingte Aktivitätszunahme an den beachteten Orten und die gleichzeitige Aktivitätsabnahme an den unbeachteten Orten gezeigt werden.

3.4.2 Ein physiologisches Korrelat der „Zoom Lens“

Müller et al. (2003) führten fMRT Experimente zur visuellen Aufmerksamkeit durch, um die Befunde von Brefczynski & DeYoe (1999) zu erweitern. Das Zoom Lens Modell besagt, dass der Aufmerksamkeitsfokus vergrößert und verkleinert werden kann. In früheren Experimenten wurde gezeigt, dass die Reaktionszeit von Versuchspersonen auf Reize im Aufmerksamkeitsfokus positiv mit der Größe des Fokus korreliert (Eriksen & St James, 1986; Eriksen & Yeh, 1985).

Wenn der Aufmerksamkeitsfokus groß war, waren die Reaktionszeiten auf Zielreize länger als wenn der Fokus auf einen kleineren Bereich beschränkt wurde.

Probanden wurden Reize an 4 möglichen Positionen auf dem Bildschirm dargeboten. Ein Hinweisreiz gab zuvor Auskunft über die Region, an der ein Zielreiz zu erwarten war. Die Anzahl der Positionen, die der Hinweisreiz markierte, wurde variiert. Gleichzeitig änderte sich die Größe der Region, in der die Probanden nach dem Zielreiz suchen mussten.

Es zeigte sich, dass die Probanden umso langsamer auf den Zielreiz reagierten, je größer die zu beobachtende Region war. Mithilfe von fMRT wurde das BOLD Signal der retinotopen Kortexareale V1, V2, VP und V4 gemessen. Es zeigte sich, dass die Größe der signifikant aktivierten Kortexregionen mit der Größe der zu beobachtenden Fläche korrelierte. Die mittlere Aktivierung der jeweils aktiven Kortexregion nahm mit deren Größe ab. Dies wurde als physiologisches Korrelat des Zoom Lens Modells gewertet. Die Größe der Zoom Lens kann je nach Aufgabe variiert werden. Wird ein kleiner Bereich im Sehfeld beobachtet, geht dies mit einem starken Aktivitätszuwachs in dessen neuronaler Repräsentation einher, während das Beobachtet eines größeren Bereichs von einem kleineren Aktivitätszuwachs im visuellen Kortex begleitet wird.

3.4.3 Suppressionszone um das Spotlight

Eine weitere Fragestellung zum Spotlight der Aufmerksamkeit betraf dessen Übergang zum unbeachteten Bereich (Müller & Kleinschmidt, 2004). Aus Verhaltensexperimenten wurde gefolgert, dass der Übergang zwischen beachteten und unbeachteten Bereichen nicht schlagartig verläuft, sondern stetig erfolgt (LaBerge, 1983). Darüber hinaus wurde vermutet, dass das Spotlight von einer Inhibitionszone umgeben ist, die als Kontrastverstärker zwischen beachteten und unbeachteten Bereichen im Sehfeld dient (Mounts, 2000).

Im Experiment von Müller & Kleinschmidt (2004) sollten die Probanden einen Ort im Sehfeld beobachten. Gleichzeitig wurde die Aktivität in den neuronalen Repräsentationen der nahen und weiter entfernten Orte gemessen. Es zeigte sich, dass die nahen Orte in V1 weniger Aktivierung besaßen als die weiter entfernten Orte. In den Arealen V2, VP und V4 besaßen die entfernten Orte signifikant weniger Aktivierung als die nahen. Müller & Kleinschmidt (2004) folgerten aus diesem Befund, dass das Spotlight der Aufmerksamkeit von einer Inhibitionszone umschlossen ist. Die das Spotlight umgebenden rezeptiven Felder scheinen gezielt heruntergeregelt zu werden. Nach Müller & Kleinschmidt (2004) liegt die Inhibitionszone in den visuellen Arealen in Abhängigkeit der Größe ihrer rezeptiven Felder somit an verschiedenen Orten.

3.4.4 Zur Teilbarkeit des Spotlights

Auch zu den aus Verhaltensdaten gewonnenen Befunden zur Teilbarkeit des Spotlights (Cutzu & Tsotsos, 2003; Müller et al., 2005) wurde eine Replikation mittels fMRT durchgeführt (McMains & Somers, 2004).

Am Fixationsort in der Bildschirmmitte und in jedem Quadranten des Sehfelds wurden Buchstaben in schneller Reihenfolge nacheinander dargeboten. Die Darbietung von Stimuli in schneller Reihenfolge an einem festen Ort wird als RSVP bezeichnet. Die Probanden wurden instruiert, in 2 der 4 peripheren Orte beim Erscheinen eines Zielreizes eine Taste zu drücken. Gleichzeitig sollten sie Zielreize am Fixationsort ignorieren. Dabei wurde die neuronale Aktivität der peripheren Orte und den Fixationsort repräsentierenden visuellen Kortexareale V1 und V2 gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass die Aktivität der beachteten RSVP zunahm, während es zu einer leichten Abnahme der Aktivität am Fixationsort kam.

Die Ergebnisse sprachen dafür, dass die untersuchten Probanden in der Lage waren, zwei getrennte Orte im Sehfeld zeitgleich mit Aufmerksamkeit zu belegen, während die dazwischen liegenden Orte nicht beachtet wurden. In der Studie wird weiterhin von Verhaltensexperimenten berichtet, die alternative Erklärungen zur Trennung des Spotlights ausschlossen. So wurde beispielsweise gezeigt, dass die Aktivitätszunahme der beiden getrennten Orte nicht durch den schnellen Wechsel eines einzigen Spotlights zwischen den Orten erklärt werden kann.

4 Fragestellung

Im Grundlagenkapitel wurde Hintergrundwissen beschrieben, das zum Verständnis der unten berichteten Experimente vorausgesetzt wird. Hier wird zunächst der die Fragestellung betreffende Stand des Wissens zusammengefasst. Daraufhin werden zwei Modelle zur räumlich visuellen Aufmerksamkeitsverteilung außerhalb des Spotlights vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Kurzbeschreibung der Experimente, die in dieser Arbeit zum Vergleich der Vorhersagen der Modelle durchgeführt wurden.

4.1 *Stand der Forschung*

Die Spotlight Metapher wird häufig zur Beschreibung grundlegender Mechanismen der räumlich visuellen Aufmerksamkeit verwendet (Posner, 1980; Posner & Petersen, 1990; Posner et al., 1980). Das Modell besagt, dass Aufmerksamkeit wie ein Scheinwerfer im Sehfeld verschoben werden kann, um die Verarbeitung von Reizen an den beachteten Orten zu unterstützen.

Im Vergleich zu Reizen, die „im Schatten“ außerhalb des Spotlights liegen, werden Reize innerhalb des Spotlights besser verarbeitet (Eriksen & Hoffman, 1974).

Die Spotlight Metapher genießt seit Jahren hohe Popularität. Sie verdankt dies wohl vor allem ihrer Bildhaftigkeit und der daraus resultierenden Einfachheit, experimentelle Fragestellungen zur visuellen Aufmerksamkeit von ihr abzuleiten (Cave & Bichot, 1999). Es wundert nicht, dass hunderte Verhaltensexperimente zum Spotlight der Aufmerksamkeit in der Literatur zu finden sind.

Es wird angenommen, dass die Größe des Spotlights an die zu bewältigende Aufgabe angepasst werden kann (LaBerge, 1983). Stützende Befunde zu dieser Annahme wurden zur Ableitung des Zoom Lens Modells herangezogen (Eriksen & St James, 1986; Eriksen & Yeh, 1985). Stimuli innerhalb eines kleinen Spotlights werden besser verarbeitet als in einem großen (Castiello & Umiltà, 1990).

Weiterhin existieren experimentelle Belege für die Teilbarkeit des Spotlights. Es können mehrere getrennte Orte im Sehfeld gleichzeitig durch räumliche Aufmerksamkeit hervorgehoben werden (Bichot, Cave, & Pashler, 1999).

Aufmerksamkeit innerhalb und außerhalb des Spotlights scheint nicht scharf abgegrenzt sondern entlang eines Gradienten verteilt zu sein. Im Zentrum des Spotlights scheint die Aufmerksamkeitsverteilung ihr Maximum zu besitzen und nach außen hin abzunehmen (Downing & Pinker, 1985).

Das Spotlight soll von einer Inhibitionszone umgeben sein, die der Kontrastverstärkung zwischen beachteten und unbeachteten Bereichen dient (Cutzu & Tsotsos, 2003; Müller et al., 2005). Es wird noch diskutiert, ob die Inhibitionszone unabhängig von der zu bewältigenden Aufgabe und dem Inhalt des Sehfelds in gleicher Weise generiert wird, oder ob eine gezielte Anpassung der Aufmerksamkeitsverteilung stattfindet. Befunde aus Verhaltensexperimenten sprechen eher für die aktive Modulation der Aufmerksamkeit außerhalb des Spotlights (Cepeda et al., 1998; Facoetti & Molteni, 2000).

Neben den berichteten Verhaltensexperimenten wurden auch physiologische Messungen zum Vergleich der Vorhersagen der unterschiedlichen Modelle durchgeführt. Die Verlagerung von Aufmerksamkeit im Sehfeld geht mit einer Aktivitätssteigerung der korrespondierenden neuronalen Repräsentationen im retinotop organisierten visuellen Kortex einher (Brefczynski & DeYoe, 1999; Tootell et al., 1998).

Je größer der beachtete Bereich ist, desto geringer ist der Aktivitätsanstieg im korrespondierenden Kortex und umgekehrt (Müller et al., 2003).

Das Spotlight kann geteilt werden, so dass mehrere separate Orte gleichzeitig beachtet werden können (McMains & Somers, 2004). Das Spotlight scheint von einer Inhibitionszone umgeben zu sein (Müller & Kleinschmidt, 2004). Es zeigt sich somit, dass die Ergebnisse der physiologischen Studien in großer Übereinstimmung zu den Ergebnissen der Verhaltensexperimente stehen und die Interpretierbarkeit der Befunde erleichtern.

4.2 Zwei Modelle der Aufmerksamkeit außerhalb des Spotlights

In diesem Abschnitt werden die beiden alternativen Annahmen zur Organisation der visuell räumlichen Aufmerksamkeit außerhalb des Spotlights beschrieben. Die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente erlauben es, eine Entscheidung zwischen beiden Modellen zu treffen. Der bis jetzt beschriebene Stand der Forschung konzentriert sich auf die unterschiedliche Verarbeitung von Reizen innerhalb oder außerhalb des Spotlights. Diese Arbeit vergleicht die Verteilung der Aufmerksamkeit an Orten außerhalb des Spotlights mit unterschiedlichem Inhalt. Beide Modelle stehen im Einklang mit der zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit vorhandenen Literatur.

Modell 1 fordert, dass das Spotlight der Aufmerksamkeit von einer Inhibitionszone umschlossen ist (Cutzu & Tsotsos, 2003; Müller & Kleinschmidt, 2004; Müller et al., 2005). Die Inhibitionszone ist grundsätzlich immer vorhanden und wird nicht in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung oder des Inhalts der visuellen Szene verändert. Die Aktivierung einer Anzahl rezeptiver Felder würde somit grundsätzlich zur Hemmung der umgebenden rezeptiven Felder führen.

Beim Lesen einer Zeile dieser Seite würden somit die das Zentrum der Aufmerksamkeit umgebenden Bereiche unterdrückt, um den Kontrast zwischen beachtetem und unbeachtetem Bereich zu erhöhen. Eine mögliche Ursache für eine Lesestörung könnte in einem Defizit dieses Hemmungsmechanismus begründet sein. Eine beeinträchtigte Unterdrückung der benachbarten Zeilen könnte die Verarbeitung der gelesenen Zeile gravierend stören.

Modell 2 fordert, dass die Aufmerksamkeitsverteilung außerhalb des Spotlights aktiv an die zu bewältigende Aufgabe angepasst wird (Caputo & Guerra, 1998; Cepeda et al., 1998; Shaw & Shaw, 1977; Tootell et al., 1998). Anstatt grundsätzlich alle Reize am Rand des Spotlights in gleicher Weise zu unterdrücken, wird die Aufmerksamkeit in Abhängigkeit vom Inhalt der visuellen Szene verteilt. Störende Reize außerhalb des Spotlights werden aktiv unterdrückt, während Reize, die keinen Einfluss auf die zu bewältigende Tätigkeit besitzen, weder aktiviert noch gehemmt werden.

Für den Leseprozess würde auch das zweite Modell vorhersagen, dass die zur gelesenen Zeile benachbarten Zeilen unterdrückt werden, um die gelesene Zeile besser verarbeiten zu können. In manchen Situationen würden die

Mechanismen jedoch unterschiedlich arbeiten. Würde beispielsweise die letzte Zeile einer Seite gelesen, müsste nach Modell 1 der Bereich unterhalb und oberhalb der gelesenen Zeile in gleicher Weise unterdrückt werden. Modell 2 würde ausschließlich die Unterdrückung der oberen Ziele vorhersagen, da der leere Bereich am Seitenende keinen störenden Einfluss auf den Lesevorgang ausüben sollte.

Nachdem die beiden konkurrierenden Modelle zur Aufmerksamkeitsverteilung außerhalb des Spotlights dargestellt wurden, wird im folgenden Abschnitt beschrieben, wie die durchgeführten Experimente zur Entscheidung zwischen den Modellen beitragen können.

4.2.1.1 Umsetzung der Fragestellung in 4 Experimenten

Zum Vergleich der Vorhersagen der beiden alternativen Modelle zur Aufmerksamkeitsverteilung außerhalb des Spotlights wurden 4 Experimente durchgeführt. Die Hauptaufgabe der Probanden bestand in allen Experimenten in der Suche nach einem Zielreiz in einer in der Bildschirmmitte dargebotenen RSVP. In allen Experimenten sollten die Probanden auf das Erscheinen der Zielreize schnellstmöglich mit einem Tastendruck reagieren.

In den Experimenten 1a und 1b wurden zusätzlich zur RSVP auch störende Reize in der Peripherie dargeboten. Das experimentelle Design erlaubte die Bestimmung der Aufmerksamkeitsverteilung auf den störenden Reizen und leeren Bereichen im Sehfeld.

Die Experimente 1a und 1b prüften die Frage, ob Distraktoren außerhalb des Spotlights im Vergleich zu leeren Orten unterdrückt werden. Experiment 1a wurde als rechnergestütztes Verhaltensexperiment konzipiert, während in Experiment 1b mittels fMRT die Aktivierung der neuronalen Repräsentationen der peripheren Orte im visuellen Kortex gemessen wurde.

Eine unterschiedliche Aufmerksamkeitsverteilung auf Distraktororten und leeren Orten wäre nur mit dem zweiten Modell der Aufmerksamkeitsverteilung vereinbar, da nach dem ersten Modell alle Bereiche außerhalb des Spotlights mit gleichem Abstand zum Zentrum des Aufmerksamkeitsfokus in gleicher Weise mit Aufmerksamkeit belegt sein müssten (Abbildung 9).

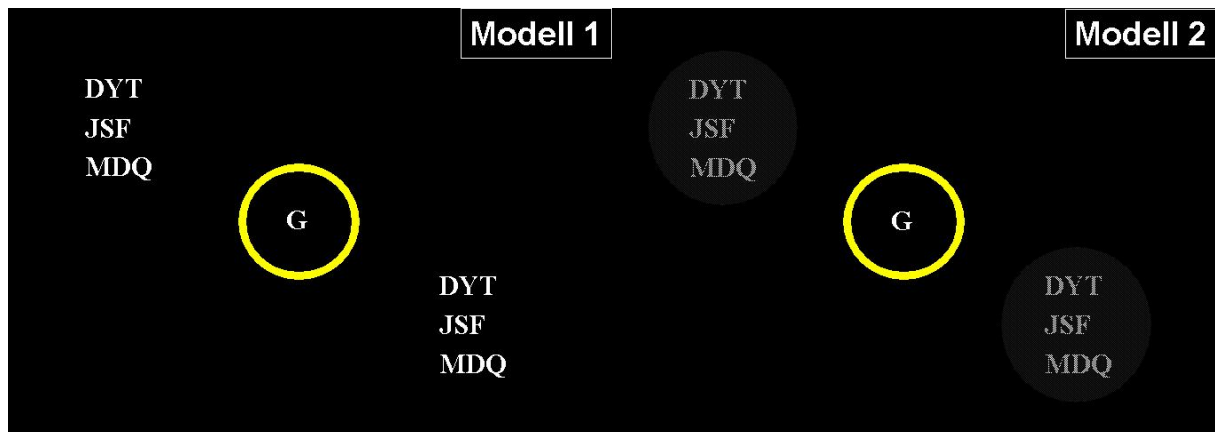


Abbildung 9. Die aus den beiden Modellen zur räumlichen visuellen Aufmerksamkeitsverteilung abgeleiteten Vorhersagen für die Experimente 1a und 1b. In der Bildschirmmitte soll von den Probanden innerhalb der RSVP nach einem Zielreiz gesucht werden. Es wird erwartet, dass das Spotlight der Aufmerksamkeit auf die Bildschirmmitte fokussiert wird. Nach Modell 1 ist Aufmerksamkeit auf Distraktoren und leeren Orten in der Peripherie gleich verteilt. Modell 2 sagt die selektive Unterdrückung der Distraktororte im Vergleich mit leeren Orten vorher.

Abbildung 9 stellt die angenommene Aufmerksamkeitsverteilung im Sehfeld dar. Es soll verdeutlicht werden, dass Modell 2 im Unterschied zu Modell 1 eine selektive Unterdrückung der Distraktoren postuliert. Um diesen Unterschied darzustellen, wurde auf eine Darstellung der Aufmerksamkeitsverteilung in Modell 1 verzichtet. Hier wären u.a. zwei alternative Versionen denkbar: Der gesamte Bereich außerhalb des Spotlights wird unterdrückt (dies hätte durch Einfärben der gesamten Peripherie dargestellt werden können) oder es findet keinerlei Modulation der Aufmerksamkeit außerhalb des Spotlight statt. In der Abbildung wird keinerlei Modulation der Aufmerksamkeit in der Peripherie dargestellt. Nach Ansicht des Autors erleichtert dies das Verständnis der Fragestellung.

Auch in den Experimenten 2a und 2b wurden zusätzlich zur RSVP weitere Stimuli in der Peripherie dargeboten. Anstatt Aufmerksamkeit auf leeren Orten und Distraktororten zu vergleichen, wurden unterschiedliche Distraktoren verwendet. Wenn der in der Peripherie dargebotene Distraktor dem gesuchten Zielreiz in der RSVP entsprach, wurde er als zielkompatibler Distraktor

bezeichnet. Alle anderen Distraktoren wurden als zielinkompatible Distraktoren bezeichnet. Die Experimente 2a und 2b prüften die Frage, ob sich visuelle Aufmerksamkeit auf zielkompatiblen und zielinkompatiblen Reizen außerhalb des Spotlights unterschiedlich verteilt.

Es wurde angenommen, dass zielkompatible Distraktoren die Reaktionszeiten auf die Ziele innerhalb der RSVP weniger stark verlangsamten als zielinkompatible (Flowers & Wilcox, 1982; Neil, 1977; Tipper & Weaver, 1994).

Wenn zielinkompatible Distraktoren stärker unterdrückt würden als zielkompatible, wäre dies nur mit dem zweiten Modell der räumlich visuellen Aufmerksamkeitsverteilung vereinbar (Abbildung 10).

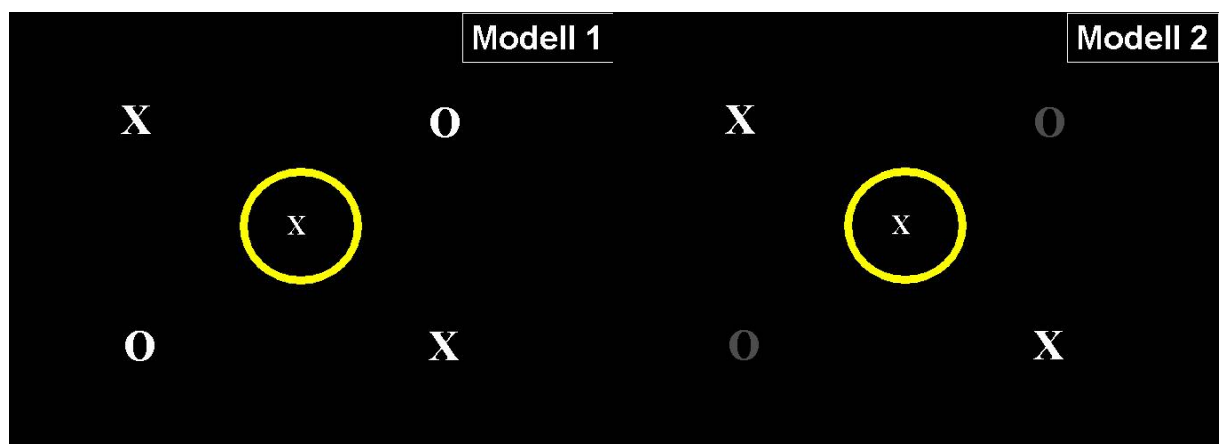


Abbildung 10. Vorhersagen der beiden Modelle für die Experimente 2a und 2b. Modell 1 sagt vorher, dass die Aufmerksamkeit auf den peripheren Distraktoren bei gleichem Abstand zum Fokus der Aufmerksamkeit gleich verteilt ist. Modell 2 sagt vorher, dass die Aufmerksamkeitsverteilung auf den peripheren Distraktoren vom gesuchten Zielreiz in der RSVP abhängig ist. Wird beispielsweise innerhalb der RSVP nach einem „X“ gesucht, erhalten die in der Peripherie dargebotenen „O“ weniger Aufmerksamkeit als die dargebotenen „X“.

5 Experiment 1a: Verhaltensbefunde zur Distraktorhemmung

Die Experimente 1a und 1b prüfen, ob periphere Distraktororte während der Suche eines Zielreizes innerhalb einer RSVP im Vergleich zu leeren Orten unterdrückt werden. In Experiment 1a sollte mittels Verhaltensdaten bestimmt werden, ob und wie stark die Erkennung der Zielreize in der RSVP durch die Darbietung stillstehender Distraktoren beeinträchtigt wird. Die Schwierigkeit der Suchaufgabe wurde variiert, indem innerhalb der RSVP nach beliebigen roten Buchstaben oder nach dem Buchstaben X gesucht werden musste.

Zusätzlich wurde die Probentechnik verwendet (Cepeda et al., 1998), um Rückschlüsse auf die Aufmerksamkeitsverteilung außerhalb des Spotlights ziehen zu können. Die Probe bestand aus dem Symbol #, das auf einem der 4 peripheren Orte dargeboten werden konnte.

Die Probanden mussten somit zwei Aufgaben gleichzeitig durchführen. Zum einen sollten sie mit einem Tastendruck auf das Erscheinen des Zielreizes in der RSVP reagieren, zum anderen sollten sie die gleiche Taste beim Erscheinen einer Probe drücken. Die Antworten der Probanden sollte jeweils schnellstmöglich gegeben werden.

5.1 Methode

In diesem Kapitel wird die in Experiment 1a verwendete Untersuchungsmethodik beschrieben. Neben der Beschreibung der untersuchten Probanden erfolgt die Darstellung des Versuchsdesigns und des verwendeten Materials.

5.1.1 Probanden

An der Untersuchung nahmen 22 Probanden (12 Frauen und 10 Männer) freiwillig teil. Das durchschnittliche Alter betrug 31 Jahre. Alle Probanden waren Rechtshänder. Sie berichteten (wie auch in den im Anschluss dargestellten Experimenten) von normaler oder zu unbeeinträchtigtem Sehen korrigierter Sehfähigkeit und Farbensehen.

5.1.2 Versuchsablauf

Die Probanden saßen ca. 60 cm entfernt von einem PC-Monitor und wurden instruiert, den Blick auf die Bildschirmmitte zu richten, ohne die Augen zu bewegen. Es wurde jedoch keine Kinnstütze verwendet. Die Augenbewegungen der Probanden wurden nicht kontrolliert.

Die RSVP wurde in der Bildschirmmitte mit einer Darbietungsdauer von 250 ms pro Buchstaben präsentiert. Eine PC-Tastatur wurde zur Antwort-erfassung verwendet. Jeder Block startete mit der Darbietung der Instruktion über den nächsten zu suchenden Zielbuchstaben in der RSVP. Ziele (Buchstabe X oder ein beliebiger roter Buchstabe), Nichtziele (Buchstaben innerhalb der RSVP, auf die nicht reagiert werden sollte) und Proben (Symbol #, das an den peripheren Orten erscheinen konnte) wurden in zufälliger Reihenfolge dargeboten (Abbildung 11). Ein Experiment bestand aus einer schriftlichen Instruktion, Übungsblöcken, experimentellen Blöcken und einer Aufklärung über den Zweck des Experiments nach Abschluss der Messung. Die Gesamtdauer betrug nicht mehr als 60 Minuten pro Proband.

5.1.3 Versuchsdesign

Es wurde ein 2*3*3 faktorielles Design verwendet. Die erste unabhängige Variable war die von den Probanden auszuführende Hauptaufgabe (Suche nach einem X vs. Suche nach einem roten Buchstaben in der RSVP). Die Probanden wurden jeweils instruiert, schnellstmöglich mit einem Tastendruck auf das Erscheinen der Zielreize innerhalb der RSVP zu reagieren.

Die zweite unabhängige Variable war die SOA⁷ zwischen der Darbietung eines Nichtziels innerhalb der RSVP und der Probe (50, 100 und 150 ms). Die dritte unabhängige Variable war der Erscheinungsort der Probe [auf dem Distraktor, auf einem leeren Ort (gegenüber einem Distraktor), auf einem leeren Ort (bei Abwesenheit von Distraktoren im Sehfeld)]. Jeder der betrachteten peripheren Orte befand sich in einem der 4 Quadranten im Sehfeld. Die unabhängigen Variablen waren die Reaktionszeiten für die Ziele und die Proben. In einem Experiment mussten die Probanden auf 814 Ziele (407 X und 407 rote Buchstaben) und 432 Proben (24 Proben je experimenteller Bedingung) reagieren.

⁷ Stimulus onset asynchrony. Die Zeit die zwischen dem Erscheinen zweier Reize vergeht.

5.1.4 Beschreibung der Blöcke und der Trialstruktur

Im Experiment wurde ein klassisches Blockdesign verwendet. Jeder Block bestand aus einzelnen Trials. Sowohl die Blöcke als auch die darin enthaltenen Trials werden in diesem Abschnitt beschrieben.

5.1.4.1 Übungsblöcke

Jeder Proband absolvierte 108 nichtregistrierte Übungstrials. Der Versuchsleiter war während der Übungsphase anwesend und verließ vor Beginn der eigentlichen Messung den Raum.

5.1.4.2 Experimentelle Blöcke

Es wurden 6 unterschiedliche Blocktypen verwendet. In der Hälfte der Blöcke musste nach einem X, in der andern Hälfte nach einem roten Buchstaben in der RSVP gesucht werden. Es gab Blöcke ohne Distraktoren, mit Distraktoren im oberen linken und unteren rechten Quadranten und Distraktoren im oberen rechten und unteren linken Quadranten des Sehfelds. Jeder Block enthielt 72 Zieltrials, 36 Probetrials und 108 Fülltrials, die in zufälliger Reihenfolge ohne Zurücklegen dargeboten wurden.

Das Experiment bestand aus zwei Durchgängen mit jeweils 12 Blöcken. Die beiden Durchgänge wurden von einer längeren Pause (mindestens 5 Minuten) unterbrochen.

5.1.4.3 Beschreibung der Trials

Fülltrials präsentierten ein neues Nichtziel in der RSVP. Der Zweck der Fülltrials bestand einzig in der Erzeugung zufälliger zeitlicher Abstände zwischen den Darbietungen von Zielen und Proben.

Probetrials begannen mit der Darbietung eines Nichtziels in der RSVP. Die Probe wurde anschließend mit einer SOA von 50, 100 oder 150 ms für 50 ms auf einem der 4 peripheren Orte dargeboten. Danach erfolgte die Darbietung von 4 weiteren Nichtzielen in der RSVP. Diese garantierte, dass genügend Zeit zur Answerfassung zur Verfügung stand, bevor eine weitere Probe bzw. ein weiteres Ziel dargeboten wurde.

Zieltrials begannen mit der Darbietung des Ziels innerhalb der RSVP. Im Anschluss folgte die Darbietung von 4 Nichtzielen. Die Zieltrials endeten nach der Darbietung der 4 Nichtziele. Erst im Anschluss konnte ein neuer Trial beginnen.

Die drei Trialsorten wurden innerhalb eines Blocks in zufälliger Reihenfolge ohne Unterbrechung dargeboten. Für die Probanden entstand der Eindruck einer kontinuierlichen Darbietung von Buchstaben in der RSVP. Beginn und Ende eines Trials waren nicht ersichtlich. Während eines Blocks wurde die RSVP zu keinem Zeitpunkt unterbrochen. Die Darbietung der Distraktoren blieb während eines Blocks unverändert.

5.1.5 Material

Das Experiment wurde mit einem IBM kompatiblen PC durchgeführt. Die Reize wurden auf einem 17" Röhrenmonitor dargeboten. Zur Answerfassung diente eine gewöhnliche PC Tastatur. Die erforderliche zeitliche Genauigkeit der Stimuluspräsentation und der Answerfassung wurde durch die Verwendung der ERTS Software garantiert (Beringer, 1993).

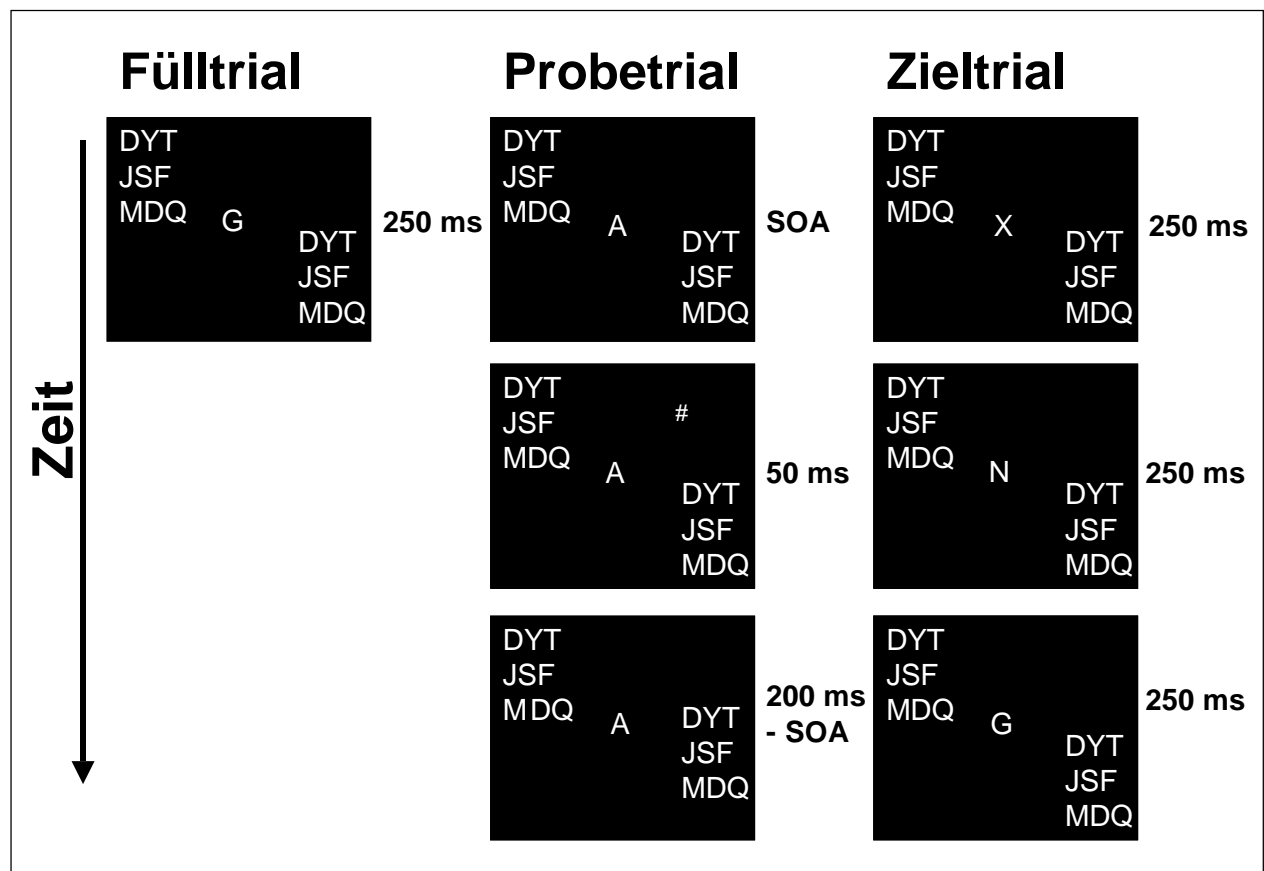


Abbildung 11. Trialstruktur des Experiments 1a. Fülltrials boten für 250 ms ein Nichtziel (einen Buchstaben auf den keine Reaktion folgen sollte) innerhalb der RSVP dar. Probetrials begannen mit der Präsentation eines Nichtziels innerhalb der RSVP und zeigten anschließend die Probe (Symbol #) an einem der 4 peripheren Orte. Zieltrials boten das Ziel (entweder X oder ein beliebiger roter Buchstabe) innerhalb der RSVP dar. Auf die Proben und die Ziele sollte jeweils mit einem Tastendruck reagiert werden.

Bei einem Abstand von 60 cm vom Bildschirm betrug die Größe der Buchstaben innerhalb der RSVP $1,7^\circ \times 1,7^\circ$ Sehwinkel. Die Größe der Distraktoren betrug $7,1^\circ \times 5,1^\circ$ Sehwinkel. Jeder Distraktor bestand aus 9 zufällig ausgewählten Buchstaben. Die Helligkeit von Distraktoren und der RSVP war

identisch⁸. Buchstaben, die als Distraktoren dargeboten wurden, waren nicht in der RSVP enthalten. Der Abstand zwischen RSVP und den peripheren Orten betrug 4,8° Sehwinkel. Die in Experiment 1a verwendeten Reizgrößen und -abstände wurden als Vorlage für die weiteren Experimente genutzt. In den fMRT Studien (Experiment 1b und Experiment 2b) wurden die Reizgrößen derart angepasst, dass die bei der Betrachtung der Reize durch das verwendete Spiegelsystem entstehenden Sehwinkel denen von Experiment 1a entsprachen.

⁸ Die Farbe der Distraktoren änderte sich nicht.

5.2 Ergebnisse

Es wurde postuliert, dass Reaktionen auf Ziele und Proben unmöglich schneller als 100 ms nach deren Darbietung erfolgen konnten. Gleichzeitig wurde angenommen, dass eine „schnellstmögliche“ Reaktion nicht langsamer als eine Sekunde nach der Reizdarbietung erfolgen würde. Um antizipatorische und verlangsamte Antworten zu entfernen, wurden Reaktionszeiten kürzer als 100 ms und länger als 1000 ms von der Auswertung ausgeschlossen.

Der mittlere Anteil ausgeschlossener Trials betrug 6 %. Die mittlere Antwortwahrscheinlichkeit auf Proben und Ziele lag bei 88 % und erschien als zu hoch, um sie zur inhaltlichen Interpretation der Daten heranzuziehen. Der Vollständigkeit halber werden die Antwortwahrscheinlichkeiten jedoch beschrieben.

Die mittleren Reaktionszeiten für die Ziele innerhalb der RSVP sind in Abbildung 12 dargestellt. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Distraktor (anwesend vs. abwesend) und Ziel (X vs. roter Buchstabe) zeigte einen signifikanten Einfluss beider unabhängigen Variablen [Ziel: $F(1, 21) = 81,17$, $p < 0,001$; Distraktor: $F(1, 21) = 13,09$, $p < 0,01$]. Es waren keine statistisch relevanten Interaktionen zu beobachten ($p > 0,2$).

Für alle berichteten Varianzanalysen wurden auch konservativere ANOVAs unter Berücksichtigung der Anpassungen von Greenhouse-Geisser und Huynh-Feldt berechnet. Es ergaben sich jedoch keine qualitativen Änderungen bezüglich der Entscheidungen hinsichtlich der Hypothesen. Weiterhin wurden für alle berichteten Haupteffekte soweit es sinnvoll erschien Wilcoxon Tests berechnet. Auch hier blieben alle berichteten Ergebnisse statistisch signifikant.

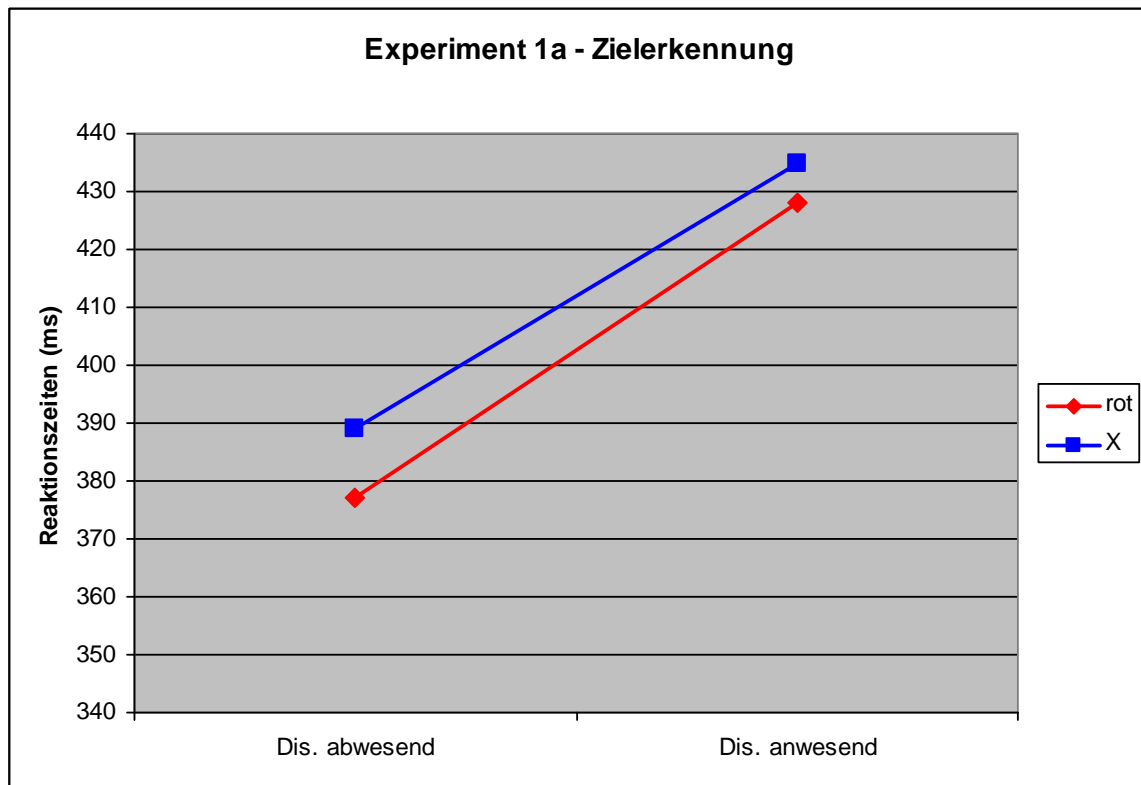


Abbildung 12. Reaktionszeiten (ms) auf die Ziele innerhalb der RSVP. Distraktoren konnten dabei anwesend oder abwesend sein. Es wurde nach X oder nach roten Buchstaben innerhalb der RSVP gesucht. Alle Bedingungen wurden innerhalb der Probanden variiert.

Die mittleren Antwortwahrscheinlichkeiten für die Ziele innerhalb der RSVP sind in Tabelle 1 dargestellt. Wie beim Vergleich der Reaktionszeiten zeigte eine Varianzanalyse mit Messwiederholung einen signifikanten Einfluss beider unabhängiger Variablen.

Tabelle 1. Mittlere Wahrscheinlichkeit der Antwort auf die Ziele innerhalb der RSVP in Experiment 1a. Die Standardabweichungen sind in Klammern dargestellt. X werden seltener innerhalb der RSVP entdeckt als rote Buchstaben. Die Anwesenheit der Distraktoren senkt die Trefferrate der Ziele.

		Distraktor	
		anwesend	abwesend
Ziel	X	0,84 (0,167)	0,85 (0,17)
	rot	0,93 (0,095)	0,94 (0,086)

Bei Anwesenheit von stillstehenden peripheren Distraktoren waren die Reaktionszeiten für die zentralen Zielreize länger als bei Abwesenheit der Distraktoren [$F(1, 21) = 6,70, p < 0,05$]. Die Reaktionszeiten für rote Buchstaben waren kürzer als für X [$F(1, 21) = 17,28, p < 0,001$]. Es waren keine statistisch relevanten Interaktionen zu beobachten ($p > 0,2$). Die Betrachtung der Antwortwahrscheinlichkeiten ergibt ein vergleichbares Bild.

Die mittleren Reaktionszeiten für die Proben sind in Abbildung 13 dargestellt. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Ziel (X vs. roter Buchstabe), Ort der Probe (gegenüber einem Distraktor, auf einem Distraktor, oder auf einem leeren Ort bei Abwesenheit von Distraktoren) und SOA (50, 100 und 150 ms zwischen Erscheinen eines Nichtziels in der RSVP und dem Erscheinen der Probe) wurde berechnet, um die Reaktionszeiten für die Proben zu vergleichen.

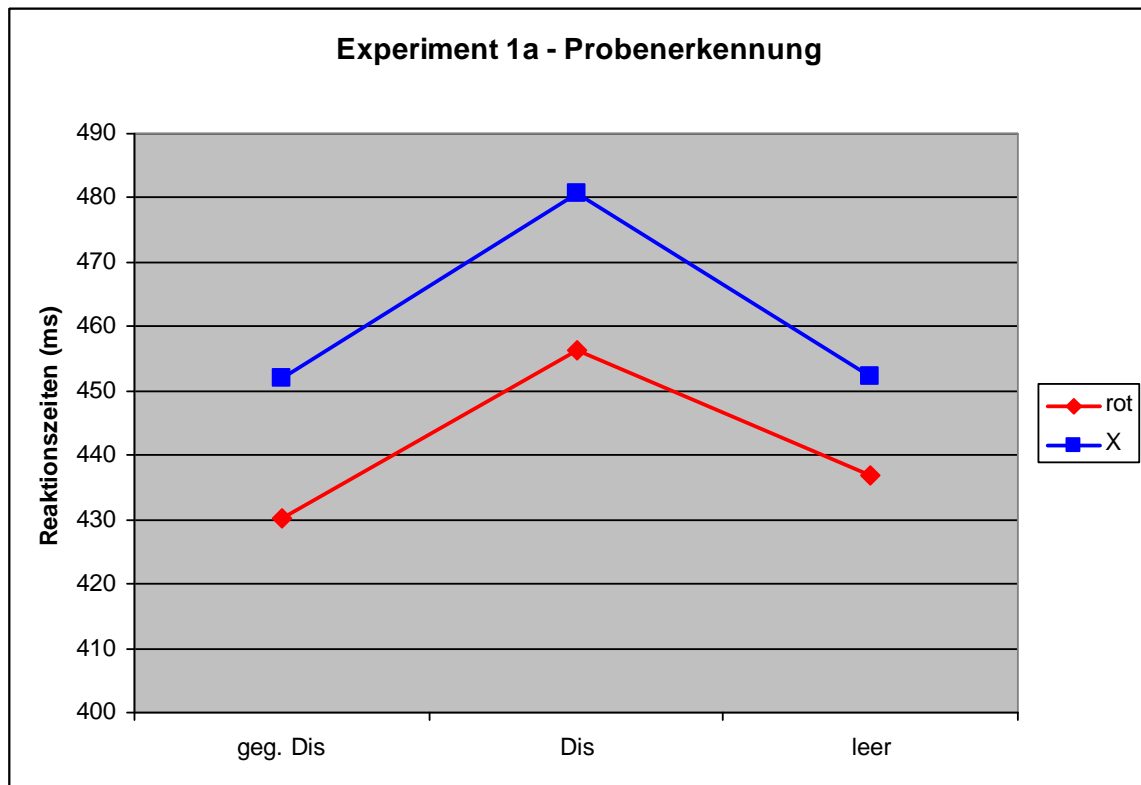


Abbildung 13. Mittlere Reaktionszeiten auf die Proben in Abhängigkeit der Suchaufgabe (Suche X / Suche Rot) und dem Ort der Probe (gegenüber einem Distraktor, auf einem Distraktor oder auf einem leeren Ort ohne Distraktor) in Experiment 1a. Die statistische Auswertung ergab, dass Proben bei der gleichzeitigen Suche nach roten Buchstaben schneller erkannt werden als bei der Suche nach X. Proben wurden auf den Distraktororten langsamer erkannt als auf den leeren Orten.

Es ergaben sich statistisch signifikante Einflüsse der Variablen Ziel und Ort der Probe [Ziel: $F(1, 21) = 26,1$, $p < 0,001$; Ort der Probe: $F(2, 42) = 41,36$, $p < 0,001$]. Proben wurden schneller bei der Suche nach roten Buchstaben in der RSVP erkannt als bei der Suche nach X. Der Faktor SOA blieb statistisch unbedeutend ($p > 0,1$). Es gab keine signifikanten Interaktionen. Bonferroni-korrigierte Einzelvergleiche zeigten signifikante Unterschiede zwischen Distraktororten und leeren Orten ($p < 0,01$), es konnte jedoch kein bedeutender Unterschied zwischen leeren Orten bei Anwesenheit von Distraktoren und leeren Orten bei Abwesenheit von Distraktoren gefunden werden ($p > 0,06$).

Es zeigt sich, dass die Reaktionszeiten für Proben auf Distraktororten länger waren als an leeren Orten. Die Anwesenheit von Distraktoren im Sehfeld verändert jedoch nicht die Reaktionszeiten für Proben an leeren Orten.

Eine weitere Varianzanalyse mit Messwiederholung wurde für die mittleren Antwortwahrscheinlichkeiten auf die Proben berechnet (Tabelle 2). Hier konnte jedoch nur der signifikante Einfluss der Variablen „Ziel“ bestätigt werden [$F(1, 21) = 7, p < 0,015$]. Alle anderen Variablen waren statistisch unbedeutend.

Tabelle 2. Gemittelte Wahrscheinlichkeiten der Antworten auf die Proben in Experiment 1a. Die Proben konnten auf einem Distraktor, gegenüber einem Distraktor oder in Bedingungen ohne Distraktoren (Leer) dargeboten werden.

		Probe		
		Distraktor	geg. Distraktor	Leer
Ziel	X	0,87 (0,179)	0,85 (0,101)	0,86 (0,092)
	rot	0,87 (0,138)	0,91 (0,069)	0,95 (0,077)

5.3 Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass die bloße Anwesenheit stillstehender peripherer Distraktoren die Reaktionszeiten auf einen Zielreiz innerhalb der RSVP verlängert. Die im Experiment 1a verwendeten Distraktoren üben einen messbaren störenden Einfluss auf die im Experiment zu bewältigende Aufgabe aus. Es gab keine Interaktion zwischen der Art des Ziels innerhalb der RSVP und der Anwesenheit der Distraktoren. Die mittleren Reaktionszeiten für rote Buchstaben waren kürzer als die für den Zielbuchstaben X. Wider Erwarten konnte kein Einfluss der Aufgabenschwierigkeit auf die Größe der durch die Distraktoren verübten Störung nachgewiesen werden (Lavie, 1995; Lavie & Tsai, 1994).

Von größtem Interesse war der Vergleich der Reaktionszeiten auf die Proben. Die Varianzanalyse ergab, dass sowohl das gesuchte Ziel als auch der Erscheinungsort der Proben einen signifikanten Einfluss auf die Reaktionszeiten besaßen. Es machte keinen Unterschied, ob Proben auf leeren Orten bei Abwesenheit von Distraktoren oder auf leeren Orten bei gleichzeitiger Anwesenheit von Distraktoren dargeboten wurden. Der Befund spricht dafür, dass Aufmerksamkeit an leeren Orten in der Peripherie nur unbedeutend durch die Anwesenheit von Distraktoren an anderen Orten oder durch Veränderungen der Suchaufgabe beeinflusst wird. Wenn die Aufmerksamkeit außerhalb des Spotlights moduliert wird, dann scheint sich diese Modulation vorwiegend auf die Distraktororte zu beschränken.

Der Befund, dass die Reaktionszeiten für Proben auf den Distraktororten länger waren als auf den leeren Orten, kann als notwendige aber nicht als hinreichende Evidenz für Distraktorhemmung gewertet werden, da die bloße Anwesenheit des Distraktors das Erkennen der Probe erschwert haben könnte. Um die durch Aufmerksamkeit verursachte Aktivität innerhalb der kortikalen Repräsentationen der Distraktororte messen zu können, wurde Experiment 1b konzipiert, bei dem mittels fMRT die BOLD Antworten im visuellen Kortex gemessen wurden.

6 Experiment 1b: Distraktorhemmung fMRT

Experiment 1b wurde durchgeführt, um die Frage zu klären, ob die beobachteten Reaktionszeitunterschiede für Proben an leeren Orten und Distraktororten mit aufmerksamkeitsbedingten Aktivitätsänderungen in den neuronalen Repräsentationen der peripheren Orte im visuellen Kortex im Zusammenhang stehen.

Das experimentelle Design war an das von Experiment 1a angelehnt (Abbildung 14). Die Probanden sollten blockweise entweder mit einem Tastendruck auf die Zielreize innerhalb der RSVP reagieren oder die RSVP passiv fixieren. Die Augen sollten dabei nicht vom Fixationsort wegbewegt werden. Im Unterschied zu Experiment 1a wurden in Experiment 1b keine Proben dargeboten, da dies zu unerwünschten Veränderungen des BOLD Signals innerhalb der neuronalen Repräsentationen der peripheren Orte geführt hätte.

6.1.1 Methode

Das methodische Vorgehen in Experiment 1b war an Experiment 1a angelehnt. Die Größen und Abstände des verwendeten Stimulationsmaterials wurden so angepasst, dass die innerhalb des Scanners wahrgenommen Größen und Abstände der verwendeten Stimuli denen von Experiment 1a bei einem Betrachtungsabstand von 60 cm vom Bildschirm entsprachen.

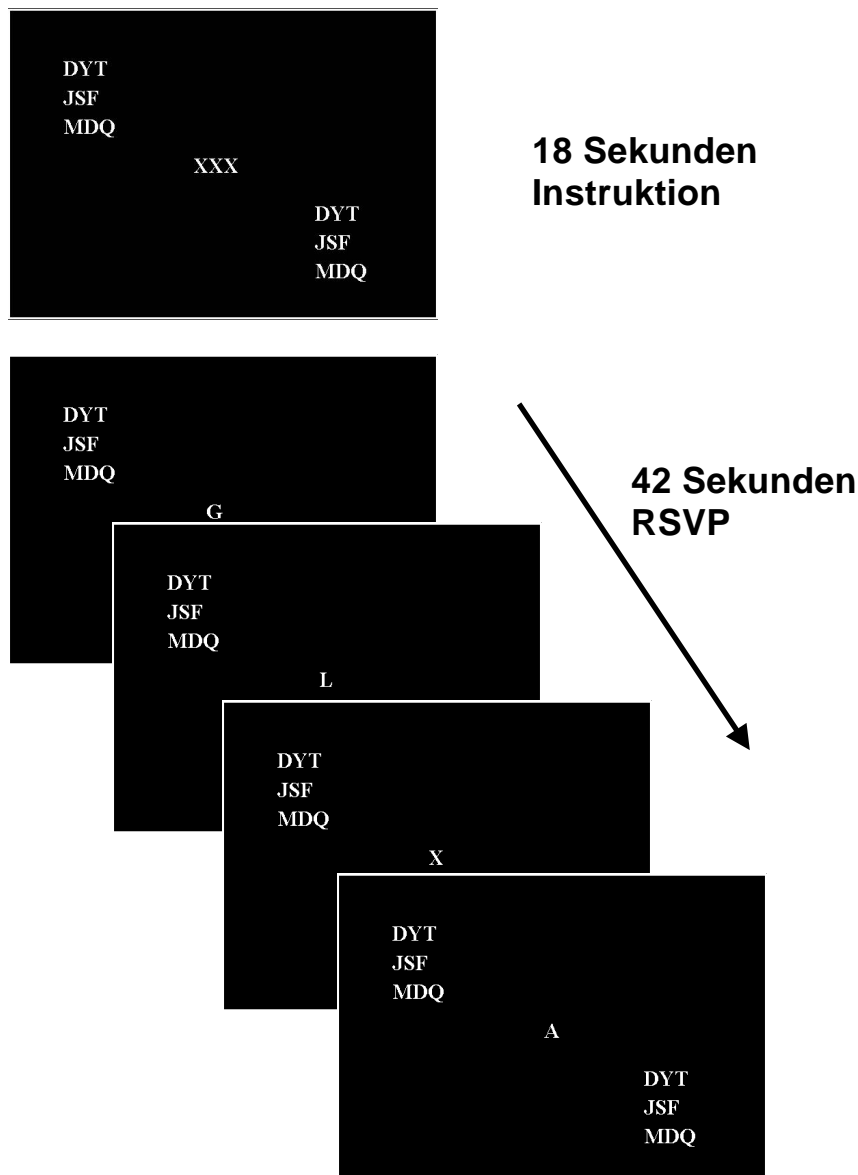


Abbildung 14. Ablauf eines Blocks in Experiment 1b. Zu Beginn eines Blocks werden die Instruktion und die Distraktoren eingeblendet. Das Bild bleibt für 18 s unverändert, um die durch das Einblenden der Distraktoren erzeugten BOLD Antworten abzuwarten. Im Anschluss beginnt die RSVP in der Bildschirmmitte.

6.1.2 Probanden

Es nahmen 8 Probanden (4 Frauen, 4 Männer) mit einem durchschnittlichen Alter von 25 Jahren an der Untersuchung teil. Für die Teilnahme erhielten die Probanden 40 € und einen auf CD gebrannten Datensatz ihres Gehirns. Mittels eines Fragebogens wurde sichergestellt, dass die Probanden die Voraussetzungen für eine (nach dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand) gefahrlose fMRT Messung erfüllten.

6.1.3 Versuchsablauf

Zu Beginn jedes Blocks wurden die peripheren Distraktoren und die Instruktion über die durchzuführende Aufgabe dargeboten. Nach 18 s wurde die Instruktion durch die RSVP ersetzt. Die Probanden sollten entweder mit einem Tastendruck schnellstmöglich auf den Buchstaben X innerhalb der RSVP reagieren oder die RSVP passiv betrachten. Suche und Fixation wechselten blockweise. Um zu vermeiden, dass die Probanden auch in der Fixationsbedingung nach dem Ziel in der RSVP suchen, war der Buchstabe X nur während der Suchbedingung in der RSVP enthalten.

Die BOLD Antworten des visuellen Kortex wurden bei jedem Proband in 3 jeweils 12minütigen fMRT Messungen erhoben. Innerhalb einer Messung wurde jede experimentelle Bedingung 3mal gemessen. Insgesamt wurden somit 9 Messungen pro Bedingungen pro Proband durchgeführt. Die Gesamtdauer der Messung eines Probanden betrug zwischen 2 und 3 Stunden.

6.1.4 Versuchsdesign

Es wurde ein 2*2 faktorielles Versuchsdesign verwendet. Die unabhängige Variable „Aufgabe“ wurde zwischen Blöcken variiert. Die Probanden sollten entweder nach dem Zielbuchstaben X innerhalb der RSVP suchen oder die RSVP passiv betrachten. Alle Bedingungen wurden innerhalb der Probanden variiert.

Die Darbietungsdauer eines Buchstabens in der RSVP betrug 200 ms⁹. Es wurden die gleichen Reizmaterialien wie in Experiment 1a verwendet. Größe und Abstände der Stimuli wurden so verändert, dass sie den Seh winkeln von Experiment 1a entsprachen.

Die unabhängige Variable Distraktor (anwesend / abwesend) wurde innerhalb jedes Blocks variiert¹⁰. Zwei Orte waren in jedem Block gefüllt, während 2 Orte leer blieben. Leere und gefüllte Orte wurden in jedem Block ausgetauscht, so dass jeder der untersuchten peripheren Orte gleich häufig leer oder mit Distraktoren gefüllt war.

⁹ Die Darbietungsdauer wurde von 250 ms auf 200 ms gesenkt, um den Schwierigkeitsgrad des Experiments zu erhöhen.

¹⁰ Im Gegensatz zu Experiment 1a waren in Experiment 1b in jedem Block Distraktoren anwesend.

6.1.5 Retinotopes mapping

Um die Grenzen der visuellen Kortexareale und die kortikalen Repräsentationen der Orte im Sehfeld bestimmen zu können, wurde zu Beginn jeder Untersuchung ein retinotopes Mapping durchgeführt.

Flickernde Schachbrettmuster wurden mit einer Flickerfrequenz von 8 Hz auf dem horizontalen und dem vertikalen Meridian dargeboten, um die Grenzen der visuellen Areale V1, V2 und V3/VP bestimmen zu können (Abbildung 2). Die gewählten Stimuli wurden schon in früheren Experimenten verwendet und zeigten für die Trennung der frühen visuellen Areale hinreichend gute Befunde (Müller et al., 2003; Müller & Kleinschmidt, 2004).

Weiterhin wurden rechteckige Schachbrettmuster in der Größe der Distraktoren auf jedem der 4 untersuchten peripheren Orte und in der Größe der RSVP auf dem Fixationsort dargeboten, um die an der Verarbeitung der peripheren Orte beteiligten visuellen Areale des Kortex zu bestimmen.

Jeder der verwendeten Stimuli wurde für 20 s dargeboten. Die Darbietung wurde in zufälliger Reihenfolge durchgeführt. Jeder Stimulus wurde 6mal wiederholt.

Die Bestimmung der neuronalen Repräsentation des Fixationsortes in V1 und V2 führte bei einigen Probanden zu unsicheren Ergebnissen. In diesen Fällen wurden die Orte anhand der anatomischen Lage geschätzt.

Auch die Trennung der durch die auf den peripheren Orten dargebotenen Schachbrettmuster erzeugten Aktivierungen des visuellen Areals V3 von höheren visuellen Kortexarealen war in einigen Fällen nicht eindeutig möglich. In dieser Arbeit werden deshalb nur die Befunde der BOLD Signale der kortikalen Repräsentationen in V1 und V2 dargestellt.

6.1.6 Beschreibung der fMRT Messung

Die fMRT Messung wurde mit einem 3T Siemens Trio MRT durchgeführt. Zur Projektion der Stimuli wurde ein Sanyo Pro xtraX Multiverse Beamer verwendet. Der Beamer war mit einem modifizierten Objektiv ausgestattet und wurde außerhalb des Scannerraums aufgestellt, so dass die MR-Messung nicht durch störende elektrische Einflüsse beeinträchtigt werden konnte.

Zur Answerfassung wurde eine speziell angefertigte Kunststoffastatur mit optischem Leiter verwendet. Die Signale des Lichtleiters wurden in elektrische Signale umgewandelt und von einem mit ERTS (Beringer, 1993) ausgestatteten PC aufgezeichnet.

Die visuelle Stimulation wurde mit dem Triggersignal des MRT synchronisiert. So konnte die millisekundengenaue Zuordnung der MR-Daten zu den experimentellen Bedingungen gewährleistet werden.

Die funktionellen Bilder wurden mit einer Standard-EPI-Sequenz aufgezeichnet. Es wurde eine 64*64 Voxel Matrix verwendet. Die Voxelgröße betrug 3,3 mm*3,3 mm. Die Schichtdicke betrug 3 mm, bei einem Abstand von 0,3 mm zwischen den Schichten. Pro Volumen wurden 32 Schichten aufgezeichnet. Als Repetitionszeit wurde 2000 ms gewählt. Die Echozeit betrug 30 ms, der Kippwinkel 60°. Jeder Messdurchgang bestand aus 3 Durchgängen mit einer Dauer von jeweils 12 Minuten (jeweils 360 Volumen). An jedem Probanden wurden 3 Messdurchgänge durchgeführt. Das retinotop Mapping wurde in einem separaten Messdurchgang erhoben. 240 Volumen (Messzeit 8 Minuten) wurden zur Bestimmung der Grenzen der visuellen Areale aufgenommen. Weitere 350 Volumen wurden zur Bestimmung der neuronalen Repräsentationen der peripheren Orte aufgenommen.

Für die anatomische Aufnahme wurde eine T1 gewichtete MP_rage Sequenz mit einer Auflösung von 1mm³ pro Voxel (144 Schichten, TR = 2250 ms, T1 = 900 ms) verwendet. Die Dauer der anatomischen Messung betrug ca. 9 Minuten.

6.1.7 Aufbereitung der Daten

Für jeden Probanden wurde geprüft, ob die gemessenen Antwortwahrscheinlichkeiten auf die Ziele innerhalb der RSVP innerhalb des anhand der Befunde aus Experiment 1a zu erwartenden Bereichs lagen. Alle Probanden reagierten auf über 80 % der in der Suchbedingung dargebotenen Ziele. Da dies als ausreichend erachtet wurde, wurden keine Probanden von der Auswertung ausgeschlossen.

Die anatomischen und funktionellen Bilder der fMRT Aufnahmen wurden mittels BrainVoyager 4.9 aufbereitet. Die anatomischen Aufnahmen wurden inhomogenitätskorrigiert, in die AC-PC Ebene rotiert und anschließend in den Talairach Raum (Talairach & Tournoux, 1988) transformiert. Für jede Großhirnhemisphäre wurde graue von weißer Substanz getrennt. Anschließend wurden Oberflächenrekonstruktionen erstellt. Diese wurden aufgeblasen und in 2-dimensionale Karten umgerechnet.

Für die funktionellen Aufnahmen wurde eine 3D Bewegungskorrektur mit sinc-Interpolation durchgeführt. Danach erfolgte die Anpassung der Aufnahmezeitpunkte der einzelnen Schichten und die zeitliche Glättung der Daten (Entfernung von linearen Trends und von vom experimentellen Design unabhängige sinusförmige Signalschwankungen).

Als Baseline wurden die Instruktionsphasen der einzelnen Blöcke (Volumen –9 bis –1) über die Bedingungen gemittelt (File Based). Hierdurch blieb die ordinale Reihenfolge der Signalgrößen der einzelnen Bedingungen erhalten.

6.2 Ergebnisse

Die gemessenen Antwortwahrscheinlichkeiten der Probanden auf die Ziele innerhalb der RSVP lagen in einem zu Experiment 1a vergleichbaren Bereich¹¹. Die über die Probanden gemittelten Zeitverläufe der BOLD Antwort der Repräsentation des Fixationsorts in V1 und V2 sind in den Abbildungen 15 (V1) und 16 (V2) dargestellt. Die BOLD Antwort fällt nach dem Einblenden der Instruktion ab und steigt beim Start der RSVP stark an. Dies entspricht der erwarteten stimulusinduzierten bottom-up Aktivierung. Da die Distraktoren in der Peripherie dargeboten werden, beeinflusst Ihre Darbietung die Repräsentationen des Fixationsorts kaum.

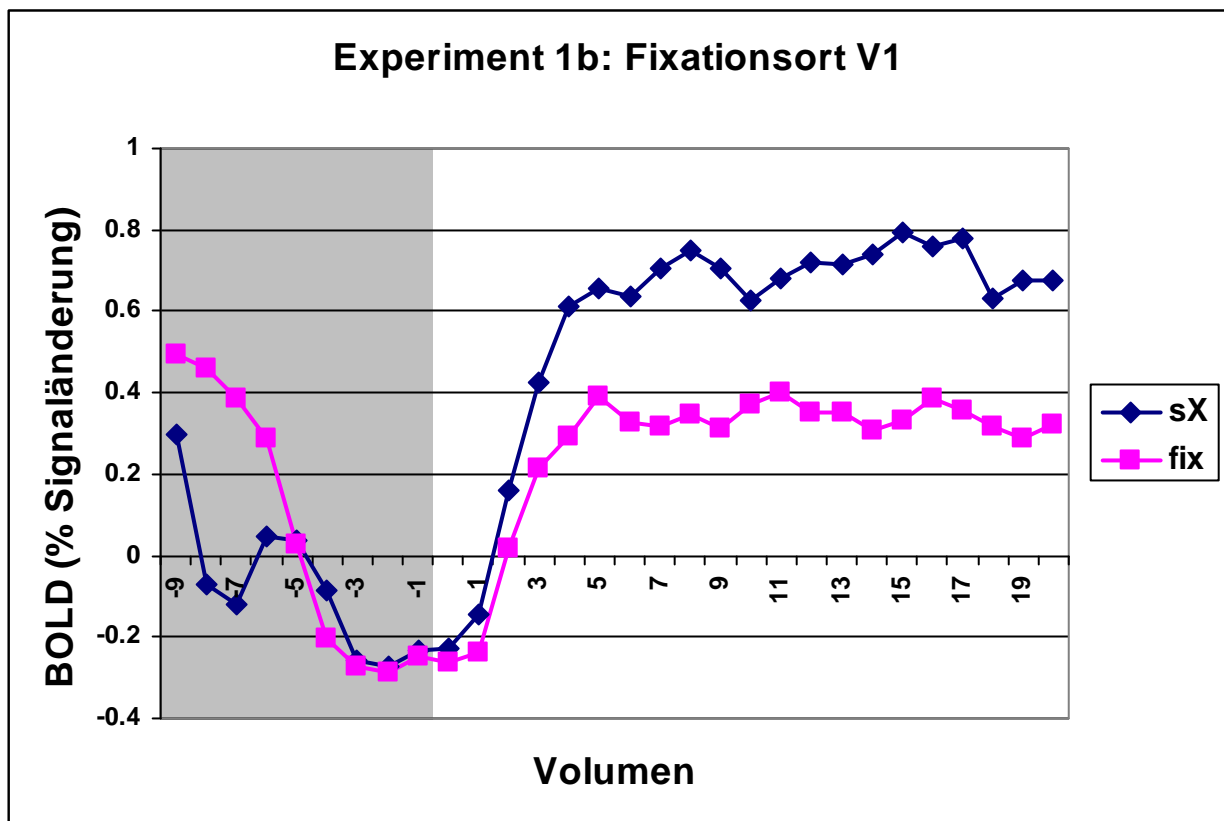


Abbildung 15. BOLD Signaländerungen in den neuronalen Repräsentationen des Fixationsorts in V1 in Experiment 1b. Die Probanden sollten entweder nach einem Zielreiz innerhalb der RSVP suchen (sX) oder die RSVP passiv betrachten (fix). Die Volumen -9 bis -1 (grau hinterlegt) entsprechen der Instruktionsphase. Die RSVP begann bei Volumen 0. Jedes Volumen entspricht einer Zeitdauer von 2 Sekunden.

¹¹ Da in Experiment 1b keine Proben dargeboten wurden, konnten die Verhaltensdaten nicht zur Bestimmung der Aufmerksamkeitsverteilung im Sehfeld herangezogen werden. Die Messung des Verhaltens der Probanden diente der Sicherstellung, dass die Probanden innerhalb des MRT die instruierte Aufgabe durchführten. Es konnte somit ausschließlich geprüft werden, dass die Probanden in der Suchbedingung auf die Ziele reagierten und während der Fixationsbedingung keine Tasten drückten.

Es ist zu erkennen, dass die BOLD Antwort bei der Suche nach dem X innerhalb der RSVP größer ist als bei passivem Betrachten. T-Tests für abhängige Stichproben wurden berechnet, um die mittlere BOLD Antwort der neuronalen Repräsentationen des Fixationsorts vom Start bis zum Ende der RSVP bei Suche und passivem Betrachten zu vergleichen. Für jeden Probanden wurde die BOLD Antworten der Volumen 0 bis 20 für jede experimentelle Bedingung gemittelt. Die Unterschiede erwiesen sich als statistisch signifikant (V1: $t = 3,152$, $df = 7$, $p < 0,01$; V2: $t = 3,407$, $df = 7$, $p < 0,01$). Die Suche nach einem Zielreiz in der RSVP ging somit im Vergleich zur passiven Fixation mit einem erhöhten BOLD Signal einher. Dies kann nicht durch unterschiedliche bottom-up Aktivierung erklärt werden, da die visuelle Stimulation in den verglichenen Bedingungen identisch war. Der Befund kann als Replikation vorhergehender Studien gewertet werden, die zeigten, dass das bei der Suche nach dem Ziel verstärkte Zuwenden von Aufmerksamkeit an einen Ort im Sehfeld mit einer erhöhten Aktivität des korrespondierenden visuellen Kortex einhergeht (Brefczynski & DeYoe, 1999; Müller et al., 2003).

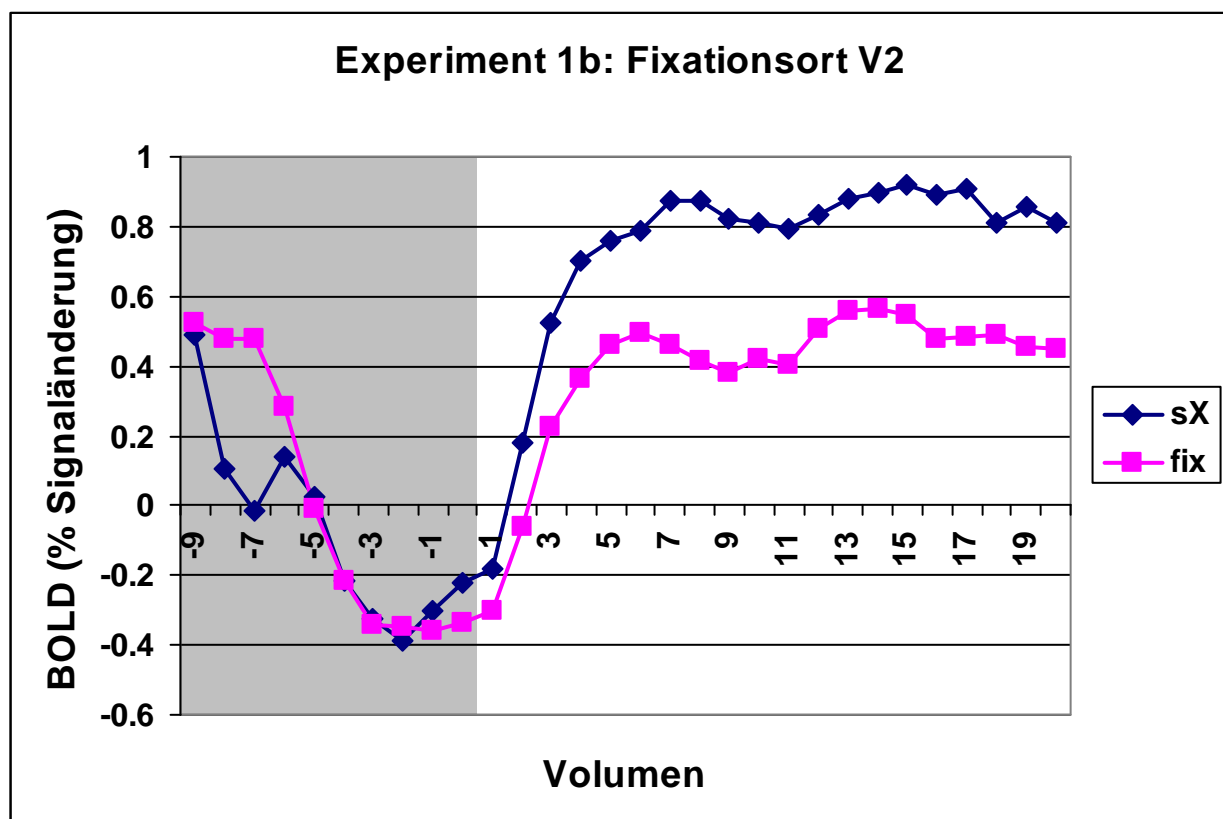


Abbildung 16. BOLD Signaländerungen in den neuronalen Repräsentationen des Fixationsorts in V2 in Experiment 1b. Die Ergebnisse entsprechen qualitativ den Befunden in V1. Die Suche nach dem X führt im Vergleich zur passiven Fixation zu einer erhöhten BOLD Antwort.

Der gemittelte Zeitverlauf der BOLD Antwort der neuronalen Repräsentationen der 4 peripheren Orte ist in Abbildung 17 (V1) und 18 (V2) dargestellt. Das Einblenden der Distraktoren geht mit einer Erhöhung des BOLD Signals einher. Der Start der RSVP führt zu einem starken Abfall des BOLD Signals sowohl in den Repräsentationen der Distraktororte als auch der leeren Orte.

Varianzanalysen mit Messwiederholung mit den Faktoren Ort (Distraktor vs. leer) und Aufgabe (Suche vs. Fixation) wurden mit den gemittelten BOLD Signalen in V1 und V2 während der RSVP Präsentation berechnet. Beide Varianzanalysen ergaben einen signifikanten Einfluss des Ortes [V1: $F(1,7) = 99,89$; $p < 0,001$; V2: $F(1,7) = 82,85$, $p < 0,001$] aber keinen Einfluss der Aufgabe [V1: $F(1,7) = 0,75$; $p > 0,4$; V2: $F(1,7) = 1,18$, $p > 0,3$]. Es ergaben sich signifikante Interaktionen Ort*Aufgabe [V1: $F(1,7) = 31,69$, $p < 0,001$; V2: $F(1,7) = 17,52$, $p < 0,01$], die belegen, dass die BOLD Antwort an den Distraktororten von der Aufgabe abhing, während es keine Unterschiede an den leeren Orten gab.

Deskriptiv war die beobachtete Unterdrückung der Distraktoren kurz nach dem Start der RSVP am größten. Diese Beobachtung ist nicht erwartet worden. Eine mögliche post hoc Erklärung hierfür könnte in der Habituation des retinalen Abbilds der Distraktoren liegen. Ein verringertes, von der Retina ausgehendes Signal der Distraktoren könnte deren störenden Einfluss und somit auch die Tendenz, die Störung zu unterdrücken, minimiert haben.

Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Abbildung 19.

Experiment 1b: Peripherer Ort V1

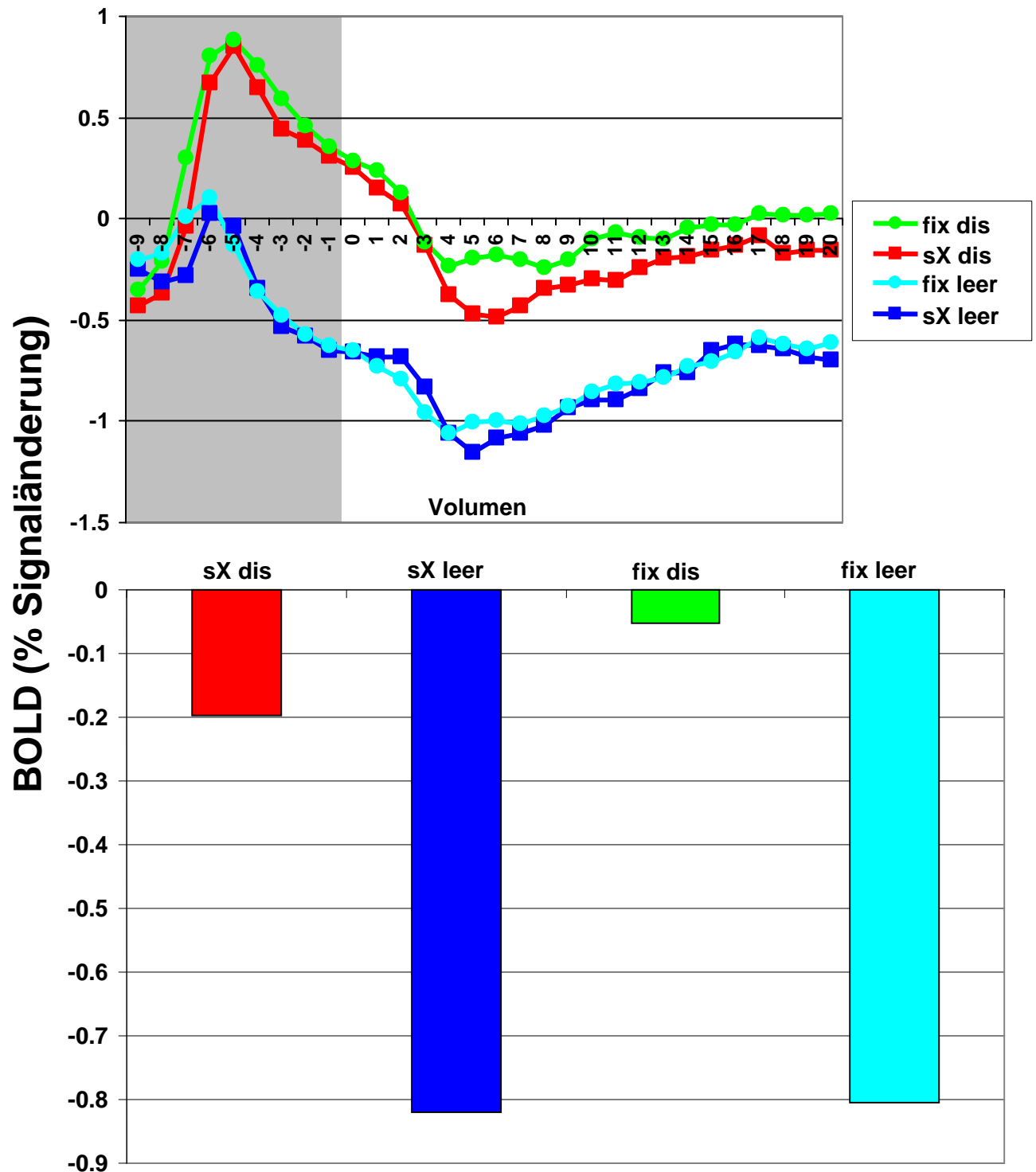


Abbildung 17. BOLD Signaländerungen der neuronalen Repräsentationen der peripheren Orte in V1. Die obere Abbildung zeigt den Zeitverlauf der Signaländerung. Die untere Abbildung zeigt die über die Zeit der RSVP gemittelte Signaländerung. Die peripheren Orte konnten entweder mit Distraktoren gefüllt (dis) oder leer sein. Die Probanden sollten innerhalb der Blöcke entweder passiv fixieren oder nach einem X innerhalb der RSVP suchen.

Experiment 1b: Peripherer Ort V2

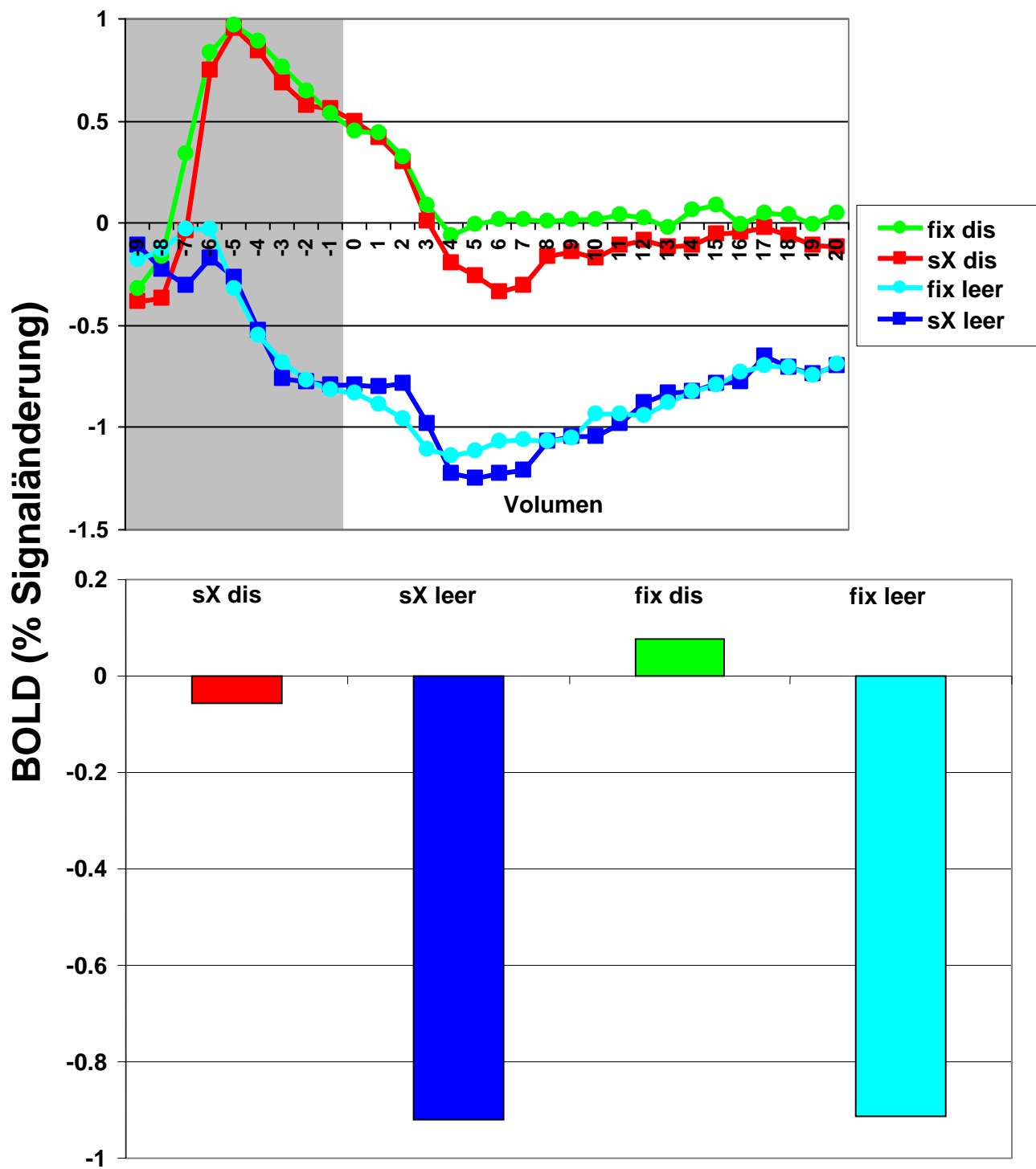


Abbildung 18. BOLD Signaländerungen der neuronalen Repräsentationen der peripheren Orte in V2. Die obere Abbildung zeigt den Zeitverlauf der Signaländerung. Die untere Abbildung zeigt die über die Zeit der RSVP gemittelte Signaländerung. Die Befunde entsprechen qualitativ den Ergebnissen von V1.

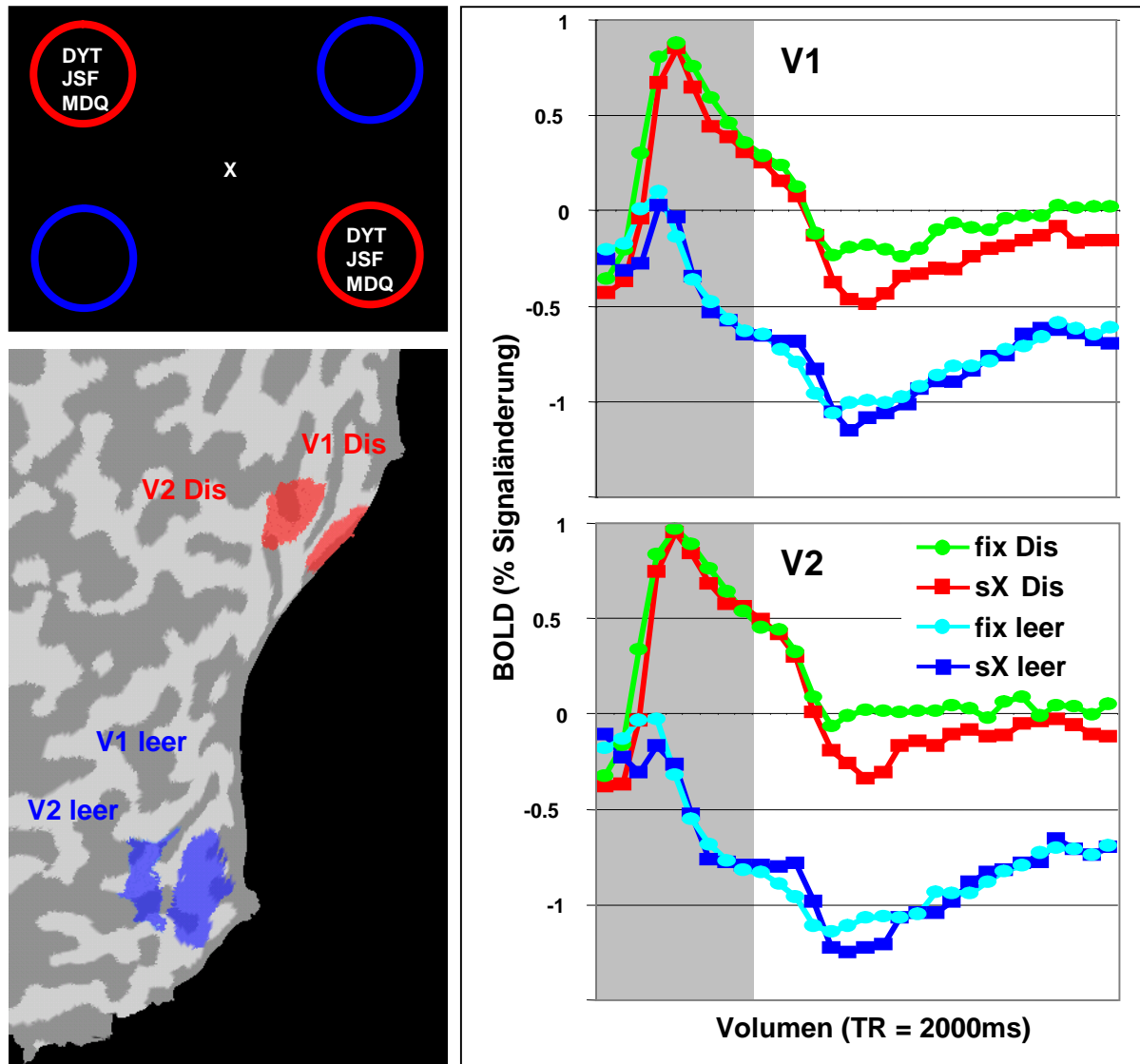


Abbildung 19. Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse von Experiment 1b. Die Probanden sollten entweder nach einem X innerhalb der RSVP suchen (sX) oder die RSVP passiv betrachten (fix). Während des Experiments wurde die Aktivität der kortikalen Repräsentationen von Distraktororten und leeren Orten in V1 und V2 aufgezeichnet. Die statistische Auswertung der Befunde ergab, dass sich die BOLD Signale der leeren Orte nicht in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabe unterscheiden. An den Distraktororten führt die Suche nach dem X im Vergleich zur Fixation zu einer signifikanten Reduzierung der BOLD Antwort.

6.3 Diskussion

Die Auswertung der fMRT Daten zeigt, dass sich die durch die Stimuluspräsentationen ausgelösten Reaktionen im korrespondierenden visuellen Kortex gut darstellen lassen. Das Einblenden der Distraktoren erzeugt ein erhöhtes BOLD Signal in deren neuronalen Repräsentationen. Auch der Start der RSVP am Fixationsort ist deutlich zu erkennen. Die RSVP führt zu einem erhöhten BOLD Signal der Repräsentationen des Fixationsortes.

Zusätzlich zu der durch den Stimulus ausgelösten Hirnaktivität lassen sich auch aufmerksamkeitsbedingte Unterschiede im BOLD Signal feststellen. Während der Suchaufgabe ist das BOLD Signal der Repräsentationen des Fixationsortes höher als bei passiver Fixation. Dieser Befund stimmt mit dem in der Literatur berichteten neuronalen Korrelat des Spotlights (Brefczynski & DeYoe, 1999; Müller et al., 2005; Somers et al., 1999) überein.

Während in Experiment 1a Verhaltensdaten als Hinweise für den störenden Einfluss der Distraktoren auf die Reaktionszeiten für Zielreize in der RSVP gesammelt wurden, sollte Experiment 1b die Unterdrückung der neuronalen Repräsentationen der Distraktororte im Vergleich zu den leeren Orten belegen. Die BOLD Signale in den kortikalen Repräsentationen der peripheren Orte unterschieden sich in Abhängigkeit von der jeweils zu bewältigenden Aufgabe und der Anwesenheit von Distraktoren. Im Vergleich zur passiven Fixation erzeugten die Distraktoren während der Suchaufgabe ein niedrigeres BOLD Signal in V1 und V2. An leeren Orten konnten keine Unterschiede zwischen Suche und Fixation festgestellt werden. Folglich stimmen die mittels fMRT gewonnenen Befunde mit dem zweiten Modell der Aufmerksamkeitsverteilung außerhalb des Spotlights überein. Die neuronalen Repräsentationen der peripheren Distraktororte scheinen während der Suchaufgabe im Vergleich zu den leeren Orten unterdrückt zu werden¹².

Die Annahme, dass eine Inhibitionszone um das Spotlight besteht, die sämtliche Reize in gleicher Weise unterdrückt, ist mit den in den Experimenten 1a und 1b gesammelten Befunden unvereinbar. Es scheint vielmehr einen Mechanismus der Aufmerksamkeitssteuerung zu geben, der Aufmerksamkeit gezielt in Abhängigkeit von der zu bewältigenden Aufgabe moduliert. Dies

¹² Eine ausführliche Diskussion zur Interpretierbarkeit unterschiedlicher Aufmerksamkeitszuwendung als Aktivierung oder Unterdrückung erfolgt in späteren Teilen der Arbeit.

geschieht nicht nur durch das Hervorheben der relevanten Information durch das Spotlight der Aufmerksamkeit sondern auch durch die selektive Unterdrückung störender Reize.

Die Messung der BOLD Signaländerungen der kortikalen Repräsentationen der Distraktoren und der leeren Orte stellt eine sinnvolle Ergänzung der Messung der Verhaltensdaten dar. Experiment 2b belegt die reduzierte neuronale Aktivität an den Distraktororten. Es kann gefolgert werden, dass die verlangsamten Reaktionen auf die Proben an Distraktororten nicht ausschließlich durch Maskierungseffekte¹³ erklärt werden können.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die neuronale Aktivität der Repräsentationen grundsätzlich höher ist als die der leeren Orte. Dieser Befund kann als die durch die Anwesenheit des Stimulus induzierte bottom-up Aktivierung erklärt werden. Die durch Aufmerksamkeitsverlagerungen bewirkte Suppression ist nicht stark genug, um die neuronale Aktivität der Distraktorrepräsentationen unter die der leeren Orte zu senken.

¹³ Als Maskierung wird in dieser Arbeit das Phänomen verstanden, dass Reize an Orten, an denen schon andere Reize dargeboten werden, in der Regel schwerer zu erkennen sind als an leeren Orten.

7 Experiment 2a : Kompatibilitätseffekt

Die Befunde aus den Experimenten 1a und 1b sind nicht mit dem vorgestellten Modell 1 der Aufmerksamkeitsverteilung vereinbar, in dem eine Suppressionszone alle peripheren Orte bei gleichem Abstand zum Aufmerksamkeitsfokus in gleicher Weise unterdrückt. In den Experimenten 2a und 2b sollte weitere Evidenz für die Annahme einer aufgabenabhängigen Aufmerksamkeitsmodulation außerhalb des Spotlights gesammelt werden.

Anstatt die Aufmerksamkeitsverteilung auf Distraktororten und leeren Orten zu vergleichen, wurde die Aufmerksamkeitsverteilung auf zielkompatiblen und zielinkompatiblen Distraktoren verglichen.

In zwei Suchbedingungen mussten die Probanden entweder nach X oder O in der RSVP suchen. Zwei der 4 peripheren Orte waren dabei mit X gefüllt, die beiden anderen Orte mit O. Bei der Suche nach X innerhalb der RSVP wurde ein X in der Peripherie als zielkompatibler Distraktor bezeichnet und ein O als zielinkompatibler Distraktor. Bei der Suche nach dem O innerhalb der RSVP waren die Bedingungen vertauscht. In Übereinstimmung mit früheren Studien (Flowers & Wilcox, 1982) wurde erwartet, dass zielkompatible Distraktoren die Reaktion auf ein Ziel innerhalb der RSVP weniger stören sollten als zielinkompatible. Bei der Suche nach X innerhalb der RSVP sollte ein X als Distraktor weniger stören als ein O. Der aus dem Modell 2 abgeleiteten Annahme folgend, dass Aufmerksamkeit gezielt moduliert wird, um den Einfluss störender Reize zu unterdrücken, wurde angenommen, dass zielkompatible Distraktoren weniger unterdrückt würden als zielinkompatible. Aufmerksamkeit sollte somit auf zielkompatiblen Distraktororten stärker verteilt sein als auf zielinkompatiblen. Im Gegensatz dazu würde das vorgestellte Modell 1 der Aufmerksamkeitsverteilung keine Unterschiede vorhersagen.

7.1 Methode

Das methodische Vorgehen in Experiment 2a war an Experiment 1a und 1b angelehnt. Abweichungen im methodischen Vorgehen werden in diesem Abschnitt beschrieben.

7.1.1 Probanden

Es nahmen 19 Probanden (8 Frauen, 11 Männer) im Alter von 20 bis 32 Jahren freiwillig an der Untersuchung teil.

7.1.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf war an Experiment 1a angelehnt. Die Probanden sollten innerhalb der in der Bildschirmmitte dargebotenen RSVP auf Zielreize und gleichzeitig auf Proben in der Peripherie reagieren. Eine kurze Instruktion zu Beginn eines Blocks informierte über das in der RSVP zu suchende Ziel. Die Probanden sollten schnellstmöglich auf das Erscheinen des Ziels innerhalb der RSVP mit einem Tastendruck reagieren. Jeder der 4 peripheren Orte war mit Distraktoren gefüllt. Die Hälfte der Distraktororte war mit X, die andere Hälfte mit O gefüllt.

Zusätzlich zu der Suche nach dem Zielreiz innerhalb der RSVP sollten die Probanden auf Probereize schnellstmöglich mit einem Tastendruck reagieren. Als Probe wurde das kurze Flackern (Ausblenden für 50 ms) eines der 4 Distraktoren verwendet. Jede Messung¹⁴ bestand aus 2 Durchgängen mit jeweils 9 Blöcken. Zwischen den Blöcken bestand die Möglichkeit für kurze Pausen. Die Pausendauer konnte von den Probanden frei gewählt werden.

Die Gesamtdauer eines Experiments (Instruktion, Übung, Messung und Aufklärung über den Zweck der Studie) betrug maximal 60 Minuten.

¹⁴ Als Messung ist hier die Datenerhebung an einem Probanden gemeint.

7.1.3 Versuchsdesign

Es wurde ein 3*2 faktorielles Design mit Messwiederholung verwendet (Tabelle 3). Die erste unabhängige Variable war das zu suchende Ziel innerhalb der RSVP (X, O oder Unterbrechung). Eine Unterbrechung der RSVP wurde erzeugt, indem im ansonsten ununterbrochenen Fluss von Buchstaben-darbietungen nach dem Ausblenden des vorhergehenden Buchstabens für 250 ms kein neuer Buchstabe dargeboten wurde.

Die zweite unabhängige Variable war die Probe (X vs. O). Das zu suchende Ziel wurde zwischen Blöcken, die Probe wurde innerhalb der Blöcke variiert.

In den beiden Bedingungen, in denen entweder auf ein X oder ein O innerhalb der RSVP reagiert werden sollte, ergaben sich kompatible (reagiere auf X innerhalb der RSVP + Probe X; reagiere auf O in der RSVP + Probe O) und inkompatible (reagiere auf X innerhalb der RSVP + Probe O; reagiere auf O in der RSVP + Probe X) Proben.

Es wurde erwartet, dass auf kompatible Proben schneller reagiert wird als auf inkompatible Proben. Die Suche nach der Unterbrechung innerhalb der RSVP diente als Kontrollbedingung. Hier wurde erwartet, dass sich die Reaktionszeiten auf die Proben nicht unterscheiden.

Innerhalb eines Experiments wurden 576 Ziele (jeweils 192 X, O und Unterbrechungen) und 576 Proben (pro experimenteller Bedingung 96 Proben) gemessen.

Tabelle 3. Versuchsdesign von Experiment 1b.

		Ziel innerhalb der RSVP		
Probe		X	O	Unterbrechung
	X	kompatibel	inkompatibel	Kontrolle
	O	inkompatibel	kompatibel	Kontrolle

7.1.4 Versuchsmaterial

Die in der RSVP dargebotenen Buchstaben entsprachen Experiment 1a. Auch die Größe der verwendeten Reize und deren Abstände entsprachen Experiment 1a. Die Darbietungsdauer der Buchstaben innerhalb der RSVP betrug 250 ms. Als Distraktoren wurden die Buchstaben X und O verwendet. An jedem der 4 Distraktororte wurde entweder ein X oder ein O dargeboten. Die Füllung der Distraktoren wurde in jedem Block ausgetauscht. Jeder Block enthielt 120 Fülltrials, 32 Proben-trials und 32 Zieltrials, die in zufälliger Reihenfolge dargeboten wurden. Die Dauer der Trials entsprach der von Experiment 1a. Das kurze Flackern eines Distraktors (Ausblenden für 50 ms) wurde als Probe verwendet. Vor dem Experiment mussten 3 Übungsblöcke mit jeweils einem der 3 im Experiment zu suchenden Ziele absolviert werden.

7.2 Ergebnisse

Reaktionszeiten, die schneller als 100 ms oder langsamer als 1000 ms waren, wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Durch dieses Kriterium entfielen weniger als 2 % der Trials.

Die Probanden antworteten in 94 % der Proben- und Zieltrials. Die Fehlerrate erschien als zu gering, um sie zu interpretieren.

Die gemittelten Reaktionszeiten für die Ziele sind in Abbildung 20 dargestellt. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Ziel (X, O oder Unterbrechung) wurde für die mittleren Reaktionszeiten der Ziele berechnet. Es wurden jedoch keine statistisch bedeutenden Ergebnisse erzielt [$F(2, 36) = 1,93, p > 0,1$].

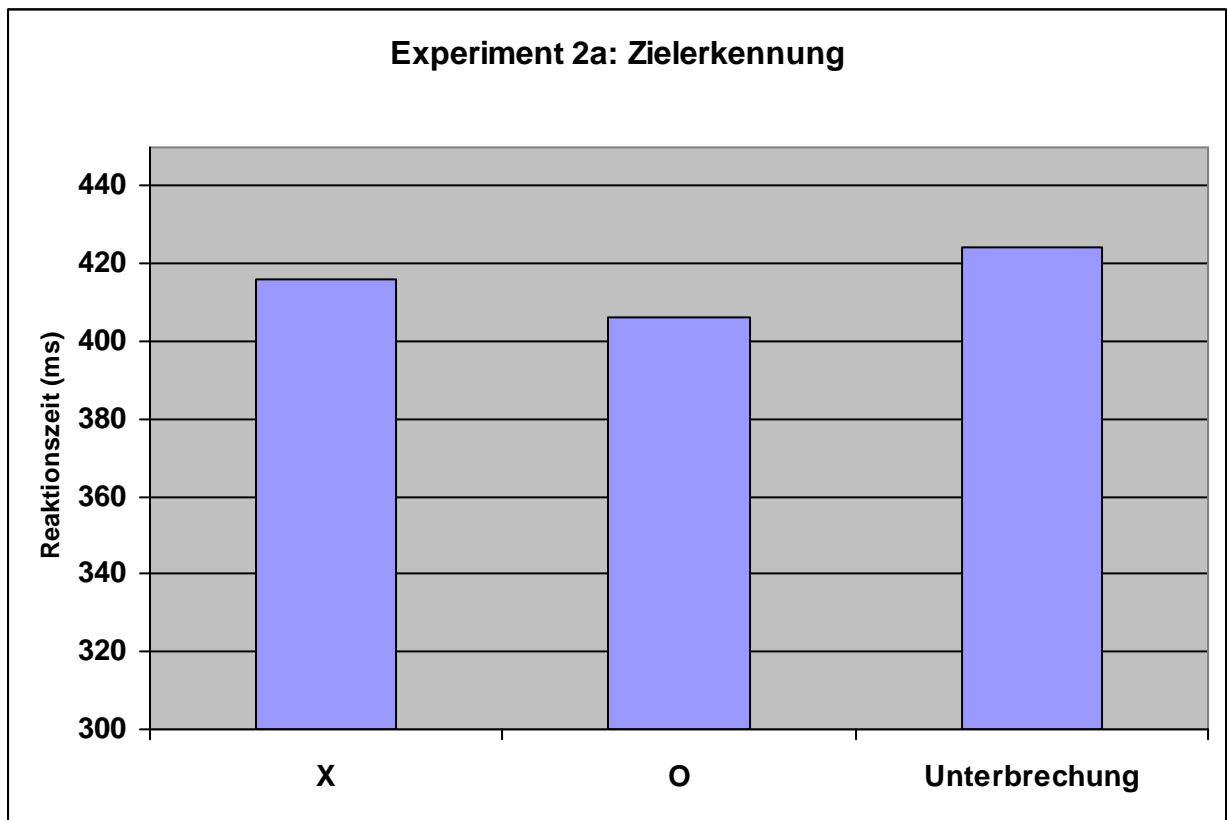


Abbildung 20. Mittelwerte der Reaktionszeiten auf die Ziele innerhalb der RSVP. Alle Bedingungen wurden innerhalb der Probanden variiert. Es ergaben sich keine statistisch bedeutenden Unterschiede. Die Probanden sollten entweder auf ein X, O oder eine Unterbrechung (das Ausbleiben einer neuen Buchstabendarbietung für 250 ms) innerhalb der RSVP reagieren.

Die mittleren Reaktionszeiten auf die Proben sind in Abbildung 21 dargestellt. Eine Darstellung der Antwortwahrscheinlichkeiten erfolgt in Tabelle 4. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Ziel (X oder O) und Probe (X oder O) zeigte einen signifikanten Einfluss des Ziels [$F(1, 18) = 9,548$, $p < 0,01$] und einen nichtsignifikanten Einfluss der Probe [$F(1,18) > 1$]. Auf die Ziele X und O wurde somit unterschiedlich schnell reagiert. Es ergab sich jedoch eine signifikante Interaktion Ziel*Probe [$F(1,18) = 36,31$, $p < 0,001$]. Die Reaktionszeiten auf die Proben unterschieden sich somit abhängig vom gesuchten Ziel.

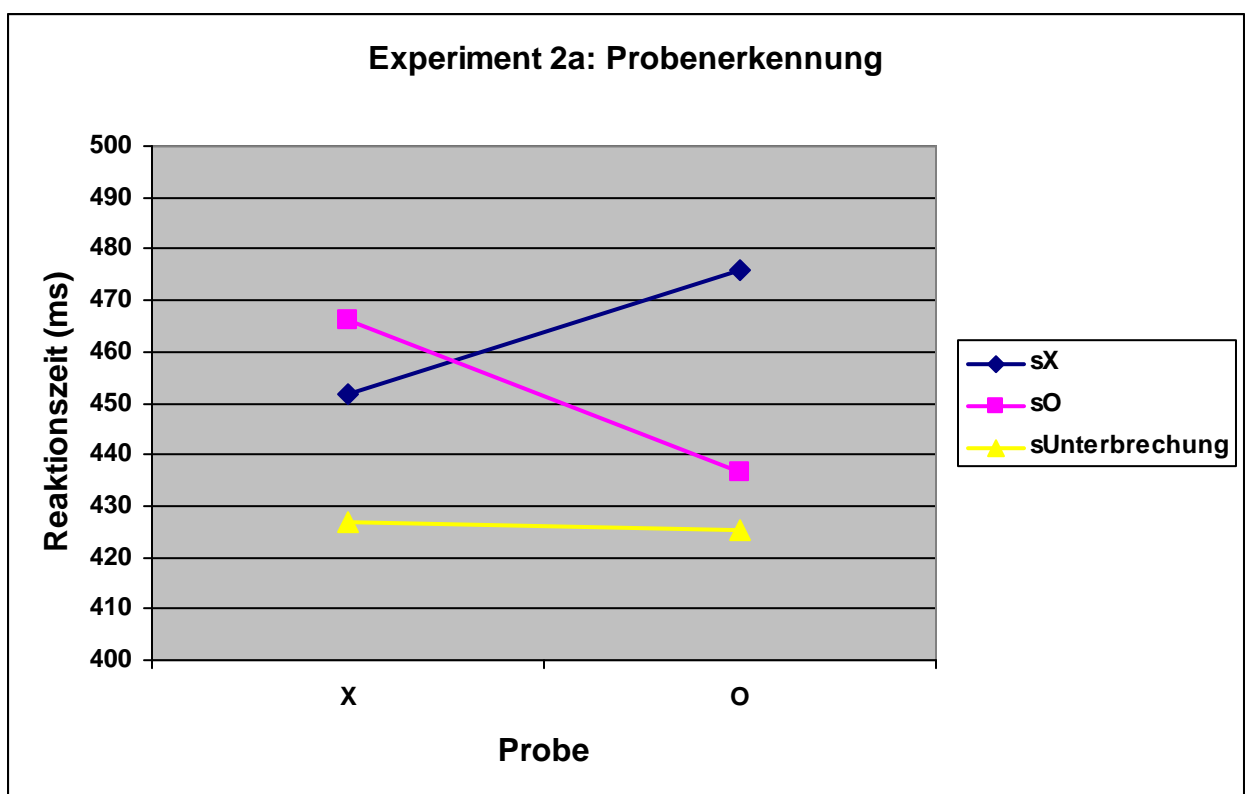


Abbildung 21. Mittelwerte der Reaktionszeiten (ms) auf die Proben in Experiment 2a. Alle Bedingungen wurden innerhalb der Probanden variiert. Die Probanden sollten entweder auf X (sX), O (sO) oder eine Unterbrechung innerhalb der RSVP reagieren.

Ein t-Test für abhängige Stichproben wurde berechnet, um die mittleren Reaktionszeiten für die Proben in der Kontrollbedingung zu vergleichen. Hier ergaben sich keine Unterschiede ($t = 0,404$, $df = 1$, $p > 0,5$). In der Kontrollbedingung wurde auf die Ziele X und O gleichschnell reagiert.

Tabelle 4. Mittelwerte und Standardabweichungen der Antwortwahrscheinlichkeiten auf die Proben in Experiment 2a.

		Ziel		
		X	O	Unterbrechung
Distraktor	X	0,98 (0,021)	0,97 (0,03)	0,96 (0,08)
	O	0,97 (0,027)	0,97 (0,023)	0,96 (0,067)

7.3 Diskussion

Experiment 2a wurde durchgeführt, um die Aufmerksamkeitsverteilung auf peripheren Distraktororten in Abhängigkeit ihrer Kompatibilität zu den innerhalb der RSVP gesuchten Zielreizen zu bestimmen.

Der statistische Vergleich der Reaktionszeiten auf die Zielreize innerhalb der RSVP ergab keine bedeutenden Unterschiede. Alle Ziele waren mit vergleichbarer Schwierigkeit zu erkennen.

Es ergab sich eine signifikante Interaktion zwischen dem innerhalb der RSVP gesuchten Ziel und der Kompatibilität der Probe. Auf kompatible Proben wurde schneller reagiert als auf inkompatible Proben. Die beobachteten Reaktionszeitunterschiede können durch Aufmerksamkeitsmodulation außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus erklärt werden. Da zielinkompatible Distraktoren die Verarbeitung des Zielreizes stärker stören als zielkompatible (Flowers & Wilcox, 1982), werden die inkompatiblen Distraktoren stärker unterdrückt als die kompatiblen. Diese Erklärung der Befunde ist nur mit dem Modell 2 der Aufmerksamkeitsverteilung außerhalb des Spotlights vereinbar.

Es sind jedoch auch alternative Erklärungen denkbar. Die beobachteten Reaktionszeitunterschiede könnten auch durch veränderte Antworttendenzen¹⁵ der Probanden erklärt werden (Ansorge, 2003; Ansorge & Wühr, 2004). Hierzu wäre keinerlei visuelle Aufmerksamkeitsmodulation erforderlich. Weiterhin könnten die kürzeren Reaktionszeiten auf kompatible Proben auch durch eine Aufmerksamkeitszuwendung zu den kompatiblen Proben und nicht als Reduzierung der inkompatiblen Proben interpretiert werden.

Um zu belegen, dass der beobachtete Effekt zumindest teilweise auf eine visuelle Aufmerksamkeitsmodulation rückführbar ist, wurde Experiment 2b durchgeführt. Dort wurde die BOLD-Antwort der neuronalen Repräsentationen der Distraktororte im retinotopen visuellen Kortex in Abhängigkeit des innerhalb der RSVP gesuchten Ziels bestimmt.

¹⁵ Die Probanden könnten beispielsweise die Instruktion missverstanden haben und in der Peripherie verstärkt nach Proben gesucht haben, die dem in der RSVP gesuchten Ziel entsprechen.

8 Experiment 2b: Kompatibilitätseffekt fMRT

In Experiment 2b wurde die in Experiment 2a betrachtete Fragestellung mittels fMRT untersucht. Die Befunde aus Experiment 2a zeigen, dass auf kompatible Proben schneller reagiert wird als auf inkompatible. Die Messung der BOLD Antworten der kortikalen Repräsentationen der Distraktororte sollte prüfen, ob die beobachteten Reaktionszeitunterschiede auf die Proben mit Aktivitätsänderungen des visuellen Kortex im Zusammenhang stehen.

Die Probanden sollten blockweise jeweils nach einem von 3 möglichen Zielen innerhalb der RSVP suchen (X, O, Unterbrechung). In jedem der 4 Quadranten befanden sich gleichzeitig X oder O Distraktoren.

Um die Messung der BOLD Antwort der kortikalen Repräsentationen der Distraktororte nicht durch das Einblenden von Proben zu beeinflussen, wurden keine Probestimuli dargeboten. Daher konnten aufgrund der Verhaltensdaten keine Aussagen über die Aufmerksamkeitsverteilung auf den peripheren Orten getroffen werden.

8.1 Methode

In Experiment 2b waren Versuchsaufbau, Stimulationssoftware und die Methode der Datenanalyse identisch zu Experiment 1b. Die verwendeten Reize entsprachen Experiment 2a.

Die Probanden sollten auf Zielreize innerhalb der RSVP schnellstmöglich mit einem Tastendruck reagieren. Da keine Proben an den peripheren Orten dargeboten wurden, konnten die Verhaltensdaten nicht zur Bestimmung der Aufmerksamkeitsverteilung herangezogen werden. Die Messung der Antworten ermöglichte jedoch die Kontrolle, dass die Probanden in allen Bedingungen die jeweils gewünschte Aufgabe durchführten.

Die Reizgrößen und Abstände wurden angepasst, damit die sich ergebenden Sehwinkel der Betrachtung der Stimuli über das Spiegelsystem im MRT denen von Experiment 2a bei einem Abstand von 60 cm vom Bildschirm entsprachen.

8.1.1 Probanden

11 Probanden (7 Männer und 4 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 24 Jahren nahmen für eine Bezahlung von 30 € an der Untersuchung teil. Alle Probanden waren Rechtshänder.

8.1.2 Versuchsdesign

Es wurde ein 3*2faktorielles Blockdesign verwendet. Der Faktor Ziel (X, O oder Unterbrechung) wurde zwischen Blöcken variiert. Der Faktor Distraktor (X oder O) wurde innerhalb der Blöcke variiert. Die Position der X Distraktoren und der O Distraktoren wurde zwischen jedem Block vertauscht. Jeder Distraktor bestand aus einem Feld von 3*3 identischen Buchstaben (9*X oder 9*O)¹⁶. Innerhalb jedes Blocks wurden 10 Ziele dargeboten.

8.1.3 Funktionelle Messung und Datenanalyse

Die gemittelte Antwortwahrscheinlichkeit auf die Zielreize innerhalb der RSVP übertraf bei allen Probanden das vor der Messung festgelegte Ausschlusskriterium von 80 %. Somit wurden keine Probanden von der Auswertung ausgeschlossen.

Die funktionelle Messung, das retinotop Mapping und die Datenanalyse wurden mit den gleichen Parametern wie in Experiment 1b durchgeführt. Das Experiment bestand aus 3 Durchgängen mit einer Dauer von 12 Minuten (360 Volumen, jeweils 1 Minute pro Block) pro Durchgang. Jede Bedingungskombination wurde in 6 Blöcken pro Proband gemessen.

Da zum retinotop Mapping die gleichen Stimuli und Auswertungsverfahren verwendet wurden, traten auch vergleichbare Probleme bei der Zuordnung der durch die an den peripheren Orten dargebotenen Schachbrettmuster verursachten Aktivierungen zu den einzelnen Arealen des visuellen Kortex auf. Deshalb beschränkt sich die Ergebnisdarstellung auf die Areale V1 und V2.

¹⁶ Die Verwendung von 3*3 identischen Buchstaben vergrößerte den mit Distraktoren belegten Bereich im Sehfeld. Hierdurch vergrößerten sich die korrespondierenden Areale im visuellen Kortex.

8.2 Ergebnisse

Die Analyse der Verhaltensdaten zeigt, dass alle Probanden die gestellten Suchaufgaben zufriedenstellend durchführten. Die Antwortwahrscheinlichkeit auf die Ziele innerhalb der RSVP lag bei 92 %. T-Tests für abhängige Stichproben ergaben keine signifikanten Unterschiede der Antwortwahrscheinlichkeiten auf die verschiedenen Ziele ($p > 0,2$). Die deskriptive Betrachtung des Zeitverlaufs des BOLD Signals in den kortikalen Repräsentationen des Fixationsorts zeigt starke Ähnlichkeit mit den in Experiment 1b ermittelten Zeitverläufen. Die BOLD Antwort fällt nach der Darbietung der Instruktion ab und steigt beim Start der RSVP stark an.

Die über die Probanden gemittelten Zeitverläufe der BOLD Antworten der neuronalen Repräsentationen des Fixationsorts sind in Abbildung 22 (V1) und 23 (V2) dargestellt¹⁷. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktor Ziel (X, O und Unterbrechung) wurde für die vom Start bis Ende der RSVP gemittelten BOLD Antworten berechnet. Es ergaben sich jedoch keine signifikanten Einflüsse in V1 und V2. Die deskriptive Betrachtung der BOLD Antworten zeigt jedoch, dass die BOLD Antwort bei der Suche nach der Unterbrechung niedriger zu sein scheint, als bei der Suche nach der X oder O. Eine Vergrößerung der Stichprobengröße hätte sicherlich statistisch absicherbare Ergebnisse erbracht.

Ein t-Test für abhängige Stichproben wurde für die gemittelten BOLD Antworten der Repräsentationen zielkompatibler und zielinkompatibler Distraktororte vom Beginn bis zum Ende der RSVP berechnet. Es ergaben sich statistisch bedeutsame Unterschiede für die Areale V1 und V2 [V1: $t = 4,47$, $df = 10$, $p < 0,001$; V2: $t = 4,65$, $df = 10$, $p < 0,001$]. Das mittlere BOLD Signal war an zielkompatiblen Orten höher als an zielinkompatiblen.

Die deskriptive Analyse der Zeitverläufe der BOLD Signale der kortikalen Repräsentationen der Distraktororte (Abbildung 24) zeigt große Übereinstimmungen mit Experiment 1b. Das Einblenden der Distraktoren führt zu einem Anstieg des BOLD Signals. Mit dem Start der RSVP fällt das Signal stark ab. Ein zusammenfassender Überblick über die Ergebnisse ist in Abbildung 25 dargestellt.

¹⁷ Da ein TR von 2000ms gewählt wurde, entsprach ein Volumen einer Zeitdauer von 2 Sekunden.

Experiment 2b: Fixationsort V1

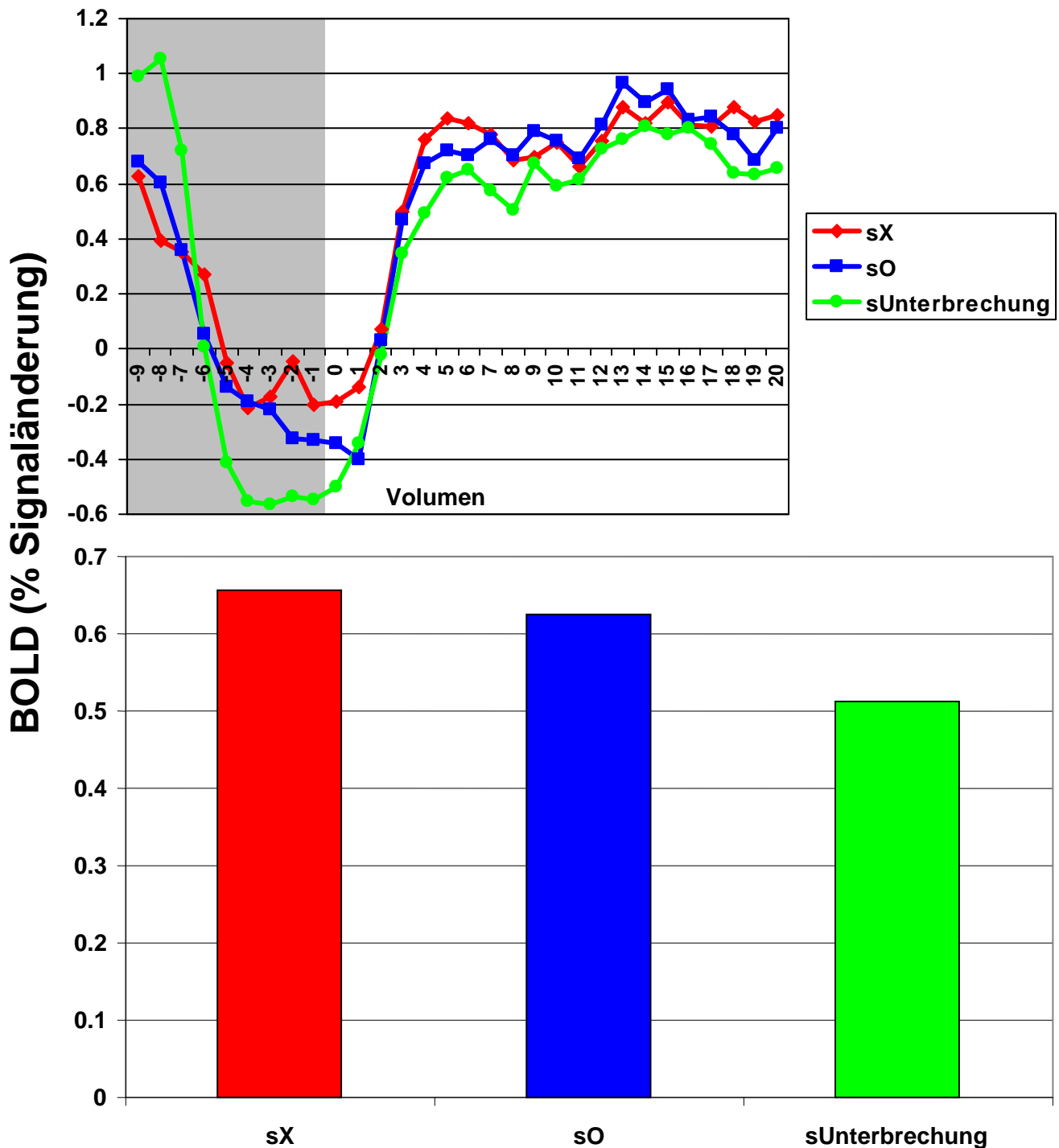


Abbildung 22. BOLD Signaländerungen der neuronalen Repräsentationen des Fixationsorts in V1. Die obere Abbildung zeigt den Zeitverlauf des BOLD Signals vom Beginn der Instruktionsphase (Volumen -9 bis -1) bis Ende der RSVP. Die untere Abbildung zeigt die über die Dauer der RSVP Präsentation (Volumen 0 bis 21) gemittelte BOLD Antwort. Es wurden die Bedingungen Suche X (sX), Suche O (sO) und Suche Unterbrechung (sUnterbrechung) verglichen. Die Auswertung ergab keine signifikanten Unterschiede.

Experiment 2b: Fixationsort V2

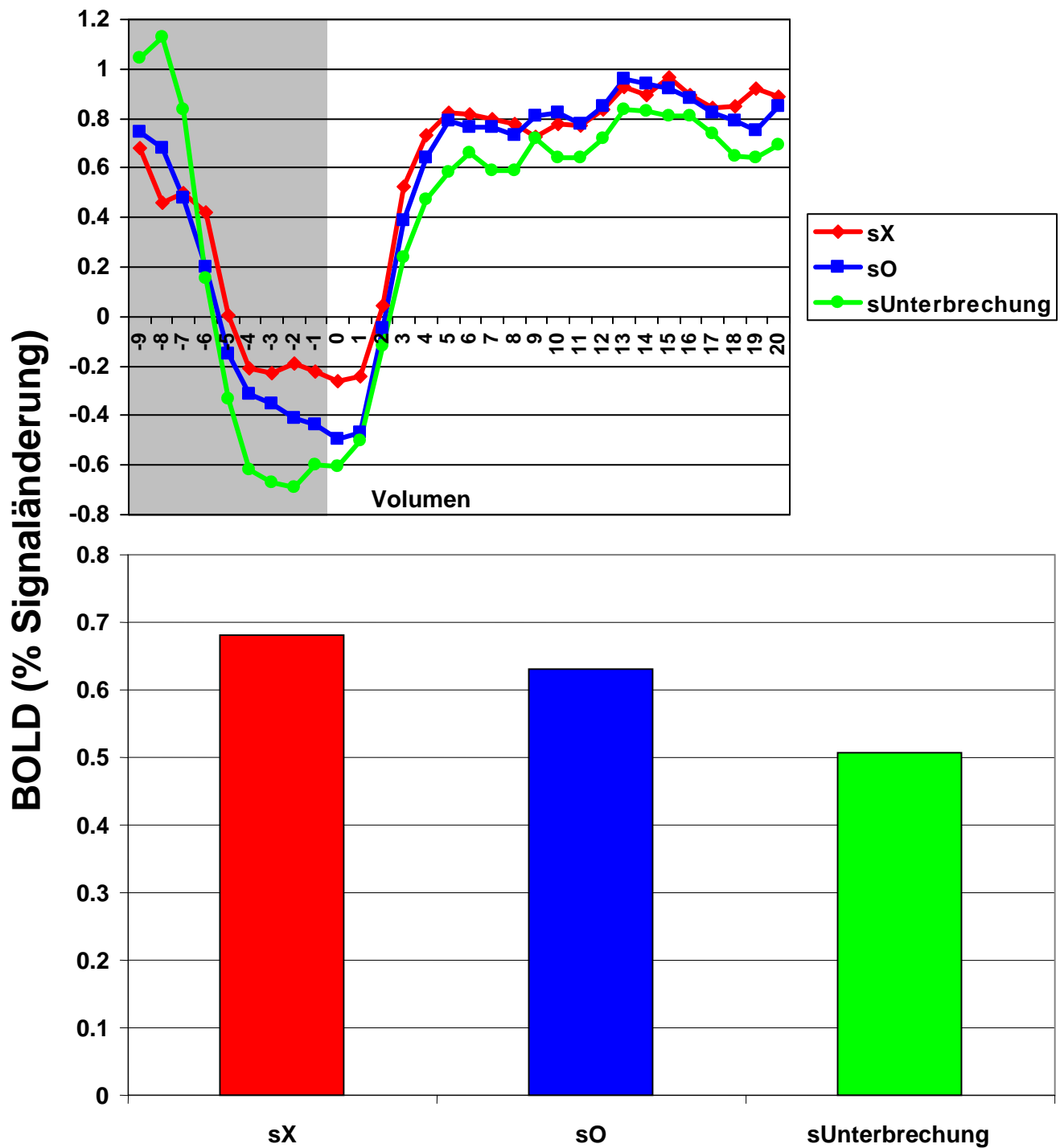


Abbildung 23. BOLD Signaländerungen der neuronalen Repräsentationen des Fixationsorts in V2.

Experiment 2b: Peripherer Ort

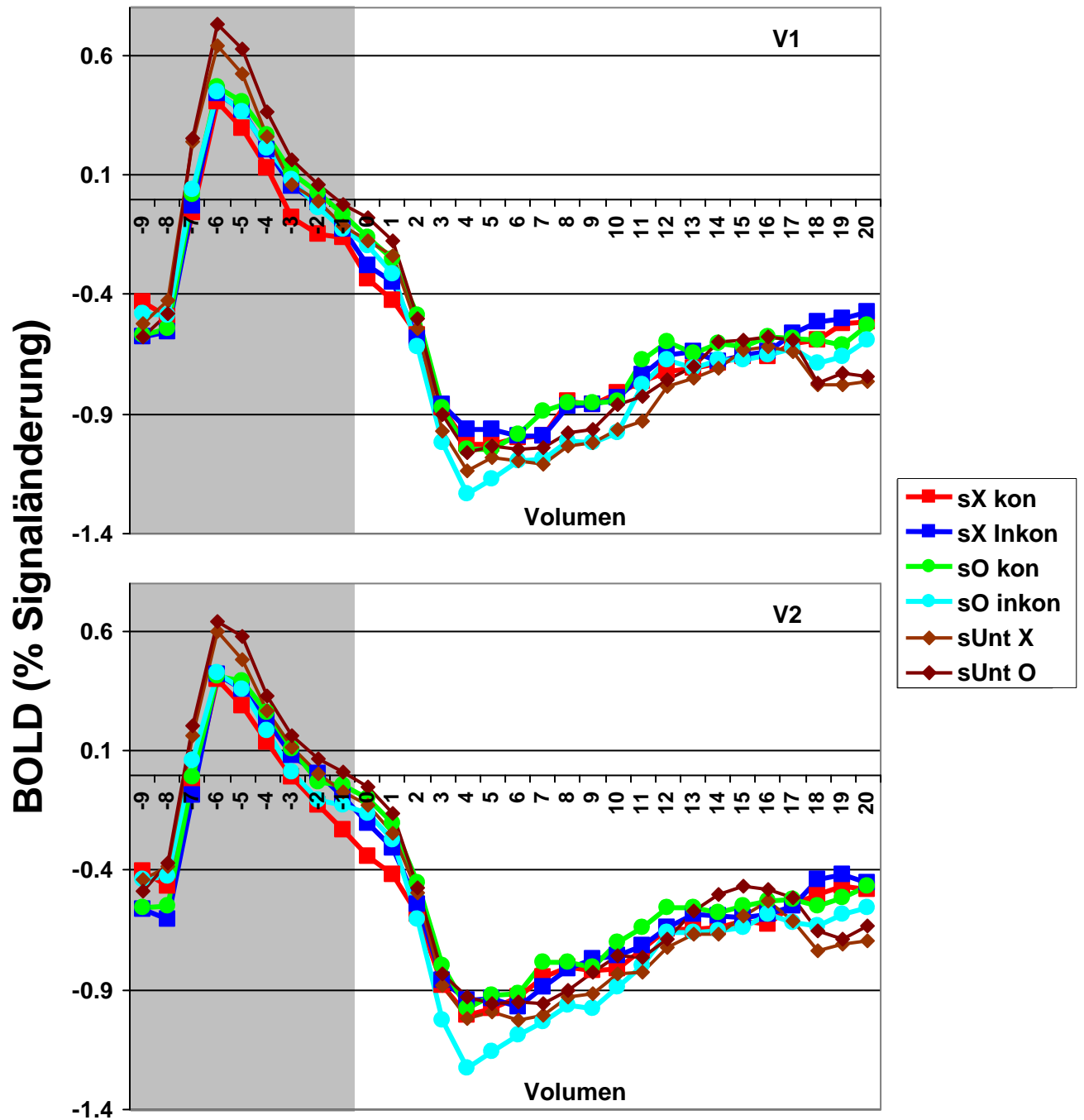


Abbildung 24. BOLD Signaländerungen der neuronalen Repräsentationen der Distraktororte in V1 und V2. Das Einblenden der Distraktoren zu Beginn eines jeden Blocks führt zu einem starken Anstieg des BOLD Signals. Nach dem Start der RSVP (Volumen 0) fällt das Signal stark ab.

Experiment 2a and 2b: Distraktor

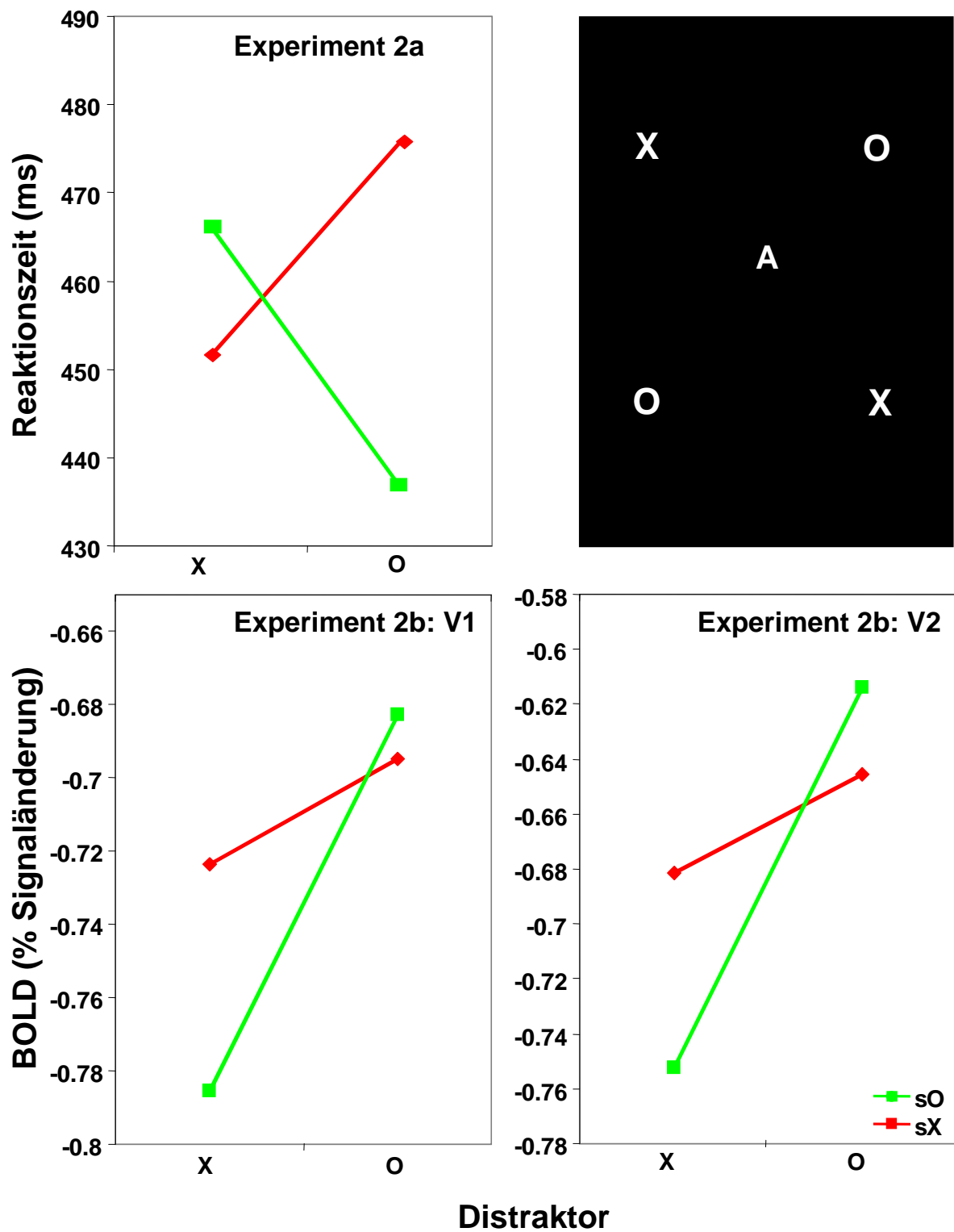


Abbildung 25. Zusammenfassung der wesentlichen Befunde von Experiment 2a und 2b. Auf zielkompatible Proben wird schneller reagiert als auf zielinkompatible. Das BOLD Signal ist an zielkompatiblen Distraktororten höher als an zielinkompatiblen.

8.3 Diskussion

Die Analyse der Antwortwahrscheinlichkeiten auf die Proben ergab, dass die Probanden die in Experiment 2b gestellte Aufgabe tatsächlich durchführten. Es ergaben sich in allen 3 Suchbedingungen vergleichbare Reaktionszeiten und Antwortwahrscheinlichkeiten auf die Ziele innerhalb der RSVP.

Die Zeitverläufe des BOLD Signals der kortikalen Repräsentation des Fixationsorts und der Distraktororte entsprechen denen von Experiment 1b. Die Zeitverläufe stimmen mit der erwarteten stimulusinduzierten bottom-up Aktivierung in den Kortexregionen überein.

Ein Ziel bei der Konzeption des Experiments war das Erzeugen dreier Suchbedingungen mit vergleichbarer Schwierigkeit. Die Verhaltensdaten aus Experiment 2a zeigten bezogen auf die Ziele keine statistisch signifikanten Reaktionszeitunterschiede. Der Vergleich des während der Darbietung der RSVP gemessenen BOLD Signals der kortikalen Repräsentationen des Fixationsorts ergab ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Zielen.

In Experiment 2a wurde gezeigt, dass Probanden schneller auf das Flackern eines zielkompatiblen Distraktors als auf das Flackern eines zielinkompatiblen Distraktors reagieren. In Experiment 2b wurde geprüft, ob diese Reaktionszeitunterschiede mit aufmerksamkeitsbedingten Änderungen der neuronalen Aktivität im visuellen Kortex im Zusammenhang stehen. Die Analyse der BOLD Signale der kortikalen Repräsentationen der Distraktororte ergab, dass das BOLD Signal zielinkompatibler Distraktoren unter dem Signal zielkompatibler Distraktoren lag. Aufmerksamkeit wird somit auch außerhalb des Spotlights in Abhängigkeit der zu bewältigenden Aufgabe verteilt.

9 Zusammenfassende Diskussion

In der zusammenfassenden Diskussion erfolgt zuerst die Darstellung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse. Danach wird auf zu überdenkende Aspekte am methodischen Vorgehen und der Interpretation der Befunde eingegangen. Anschließend werden Ideen für neue, auf den gewonnenen Befunden aufbauende, Folgeuntersuchungen beschrieben. Zum Schluss folgt dann die Darstellung möglicher Anwendungsgebiete der Befunde jenseits der Grundlagenforschung.

9.1 *Ergebnisse der Studie*

In 4 Experimenten sollte der Frage nachgegangen werden, wie sich Aufmerksamkeit außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus verteilt. Zur Bestimmung der Aufmerksamkeitsverteilung wurden sowohl Verhaltensdaten erfasst als auch die BOLD Signale der kortikalen Repräsentationen der betrachteten Orte gemessen. Die Experimente 1a und 1b untersuchten, ob Distraktoren, die Reaktion auf Zielreize innerhalb einer RSVP verlangsamen, im Vergleich zu leeren Orten unterdrückt werden. In den Experimenten 2a und 2b wurde die Aufmerksamkeitsverteilung auf zielkompatible und zielinkompatible Distraktoren verglichen.

Die Experimente sollten der Bewertung zweier Modelle der Aufmerksamkeitsverteilung dienen. Modell 1 sagt vorher, dass der Aufmerksamkeitsfokus von einer Inhibitionszone umgeben ist, die den Kontrast zwischen beachteten und unbeachteten Bereichen erhöht (Cutzu & Tsotsos, 2003; Müller & Kleinschmidt, 2004). Die Inhibitionszone existiert unabhängig von der zu bewältigenden Aufgabe und den präsentierten Inhalten im Sehfeld. Modell 2 sagt vorher, dass Aufmerksamkeit außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus in Abhängigkeit von der zu bewältigenden Aufgabe und vom Inhalt des Sehfelds verteilt wird. Die Aufmerksamkeit jenseits des Aufmerksamkeitsfokus wird demnach so verteilt, dass die zu bewältigende Aufgabe optimal durchgeführt werden kann (Reber, 1989; Shaw & Shaw, 1977).

Sowohl die im Experiment 1a gewonnenen Verhaltensdaten als auch die in Experiment 1b durchgeführten physiologischen Messungen sprechen für die aufgabenabhängige und selektive Unterdrückung von Distraktoren im Vergleich

zu leeren Orten. Die Suche nach einem Zielreiz innerhalb der RSVP führte an den Distraktororten zu größeren Reaktionszeiten auf periphere Stimuli und zu verringerter Aktivität der korrespondierenden kortikalen Repräsentationen. Die Befunde stimmen klar mit den Vorhersagen des Models 2 der Aufmerksamkeitsverteilung überein. Während der Bewältigung der Aufgabe schien Aufmerksamkeit selektiv von den Distraktoren abgezogen worden zu sein, um deren störenden Einfluss zu minimieren.

Auch der in den Experimenten 2a und 2b durchgeführte Vergleich der Aufmerksamkeitsverteilung auf zielkompatible und zielinkompatible Distraktoren spricht für selektive Aufmerksamkeitsmodulation außerhalb des Spotlights. Die in Experiment 2a gemessenen Reaktionszeiten für periphere Stimuli auf zielinkompatiblen Distraktoren waren höher als auf zielkompatiblen. Die physiologische Messung ergab eine verringerte Aktivität der zu zielinkompatiblen Distraktororten korrespondierenden Hirnregionen im Vergleich mit zielkompatiblen. Die Befunde können durch die bloße Anwesenheit einer den Aufmerksamkeitsfokus umschließenden Inhibitionszone nicht erklärt werden.

9.2 Zu überdenkende Aspekte an der Methodik und der Interpretation der Befunde

Die wesentlichen zu überdenkenden Aspekte an den in der Dissertation beschriebenen Experimenten und der Interpretation der Befunde betreffen vorwiegend die fehlende Kontrolle der Augenbewegungen der Probanden, mögliche Missinterpretationen der Instruktion und allgemeine Verbesserungsmöglichkeiten zum Versuchsdesign.

9.2.1 Einfluss von Augenbewegungen auf die fMRT Daten

Sicherlich wäre die Messung der Augenbewegung in allen berichteten Experimenten wünschenswert gewesen. Zu Beginn jedes Experiments wurden die Probanden jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, den Blick nicht vom Fixationsort abzuwenden. Der Fixationsort stellte in allen Experimenten den strategisch günstigsten Ort der Blickfokussierung dar. Die Probanden hatten keinerlei Anreiz, ihren Blick auf andere Orte zu richten.

Es ist schwer vorstellbar, dass die in den Verhaltensexperimenten gemessenen Reaktionszeiten auf Ziele und Proben durch ein systematisch mit der experimentellen Bedingung variierendes Blickverhalten erklärt werden können. Trotz dieser Überlegung ist ein möglicher Einfluss von Augenbewegungen auf die berichteten Befunde nicht vollständig auszuschließen.

Bei der Auswahl des Designs der fMRT Studien wurde darauf geachtet, den Einfluss von Augenbewegungen auf die Daten zu minimieren. Die Bedingungskombinationen der Messungen der Hirnaktivität der kortikalen Repräsentationen der peripheren Orte wurden innerhalb eines Blocks variiert. Da in den Experimenten die unterschiedlich gefüllten Orte gleichzeitig dargeboten wurden, sind die gewonnenen Daten auch gleichermaßen von Augenbewegungen beeinflusst. Die durch Augenbewegungen verursachten Aktivierungen in den untersuchten Kortexarealen sollten sich somit ausgleichen.

Während der Fertigstellung dieser Arbeit sind im Brain Imaging Center Frankfurt / Main die technischen Möglichkeiten geschaffen worden, Augenbewegungen von Probanden während fMRT Experimenten zu messen. Eine Replikation der Studien mit Kontrolle der Augenbewegungen ist somit möglich.

9.2.2 Einfluss der Instruktion auf zielkompatible Distraktoren

Der Hauptbefund von Experiment 2a war, dass die Reaktionszeiten auf die zielkompatiblen Proben kürzer waren als die auf die zielinkompatiblen. Die Befunde wurden als das Ergebnis selektiver Unterdrückung der zielinkompatiblen Distraktoren interpretiert.

Eine alternative Erklärung der Ergebnisse könnte sein, dass einige Probanden die Instruktion, innerhalb der RSVP nach einem Ziel zu suchen, derart generalisierten, dass sie auch gezielt auf das Flackern des zielkompatiblen Distraktors reagierten und gleichzeitig das Flackern der zielinkompatiblen Distraktoren als weniger wichtig erachteten. Eine durch die Missinterpretation der Instruktion bedingte Verschiebung der Aufmerksamkeit wäre auch ohne Augenbewegung möglich und somit nicht von der postulierten Distraktorenhemmung unterscheidbar. In der Instruktion wurde jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass auf das Flackern jedes peripheren Distraktors, unabhängig dessen Inhalt, reagiert werden sollte.

9.2.3 Unterscheidung von Hemmung und Verstärkung

Ein grundlegendes Problem bei der Betrachtung aufmerksamkeitsbedingter Aktivitätsunterschiede zwischen zwei experimentellen Bedingungen stellt die Interpretation dieser Unterschiede dar. Eine beobachtete Differenz zweier Aufmerksamkeitsverteilungen kann grundsätzlich durch verstärkte Aufmerksamkeitszuwendung einer Bedingung, reduzierte Aufmerksamkeit der anderen Bedingung oder beides erklärt werden (Eriksen & Hoffman, 1974).

Vergleichbare Probleme ergeben sich in den in dieser Arbeit vorgestellten Experimenten. Aus den Befunden von Experiment 1a und 1b wurde geschlossen, dass periphere Distraktoren während der Identifikation von Zielreizen innerhalb der RSVP im Vergleich zu leeren Orten unterdrückt werden. In Experiment 1b wurde gezeigt, dass die Aktivität der kortikalen Repräsentationen der peripheren leeren Orte sich nicht in Such- und Fixationsbedingung unterscheidet. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Aktivität der kortikalen Repräsentationen der Distraktororte während der Suche nach den Zielen innerhalb der RSVP unter der Aktivität bei passivem Betrachten liegt. Betrachtet man die passive Fixation als

neutrale Kontrollbedingung (Baseline), kann die reduzierte Aktivität während der Suche nach den Zielen als Unterdrückung der Distraktororte gewertet werden.

In Experiment 2a konnte gezeigt werden, dass auf kompatible Proben schneller reagiert wird, als auf inkompatible. In Experiment 2b wurde gezeigt, dass die Aktivität der kortikalen Repräsentationen kompatibler Distraktoren über der inkompatibler Distraktoren liegt. Auch hier stellt sich die Frage, ob diese Unterschiede durch eine verstärkte Hinwendung der Aufmerksamkeit zu den kompatiblen Distraktoren oder durch die Unterdrückung der inkompatiblen Proben zustande kommen. In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass das BOLD Signal der Distraktororte mit dem Beginn der RSVP in allen experimentellen Bedingungen stark abfällt. Wertet man den Beginn der Instruktionsphase (noch bevor das BOLD Signal nach dem Einblenden der Distraktoren ansteigt) als neutrale Kontrollbedingung, kann gefolgert werden, dass alle Distraktoren während der Identifikation der Zielreize innerhalb der RSVP unterdrückt werden. Diese Interpretation stimmt mit der aus den Befunden von Experiment 1a und 1b gefolgerten Unterdrückung der Distraktoren überein. Da die Aktivität der Repräsentationen der zielinkompatiblen unter der der zielkompatiblen Distraktoren liegt, ist der Schluss erlaubt, dass inkompatible Distraktoren stärker unterdrückt werden als kompatible Distraktoren.

9.2.4 Mögliche Verbesserungen der Untersuchungsmethoden

Während der Durchführung und der Auswertung der Experimente sind einige Ideen entstanden, wie das Versuchsdesign für zukünftige Experimente verbessert werden könnte. Die Vorschläge konzentrieren sich auf die Veränderung der in den fMRT Experimenten verwendeten Blocklängen, den Einsatz flackernder Distraktoren, das Austauschen der Kontrollbedingung im Experiment 2a und das grundsätzliche Erschweren der Zielerkennung.

9.2.4.1 Verkürzte Blocklängen der fMRT Messung

Bei der Wahl der Dauer der Instruktionsphase¹⁸ und der RSVP wurde in Betracht gezogen, dass das Maximum der durch visuelle Stimuli ausgelösten hämodynamischen Antworten ca. 8-10 s nach Beginn der Stimulusdarbietung einsetzt und danach langsam auf den ursprünglichen Wert zurückfällt (Logothetis, 2003). Die Dauer der Instruktionsphase wurde auf 18 s festgesetzt, um zu erreichen, dass die durch das Einblenden der Distraktoren erzeugten BOLD Signaländerungen vor dem Start der RSVP wieder auf den Ausgangswert zurückfallen.

Als Kompromiss zwischen der maximalen Anzahl Messungen pro Bedingung und der minimalen Gesamtmesszeit wurde die Dauer der RSVP Präsentation auf 42 s pro Block gesetzt. Da eine TR von 2 s verwendet wurde, konnten pro Block 21 Messungen pro betrachteter Kortexregion und Bedingung erfasst werden. Deskriptiv waren die beobachteten Unterschiede zwischen den Bedingungen während der ersten 10 aufgenommenen Volumen höher als in den folgenden Volumen. Diese unerwartete Abnahme der Signalunterschiede wurde post hoc als Folge der Habituation des retinalen Abbilds interpretiert. Falls die Abnahme der BOLD Signalunterschiede tatsächlich aufgrund von Habituation auftrat, wäre eine Verkürzung der Gesamtdauer der Betrachtung der stillstehenden Distraktoren pro Block ein Weg, diesen Einfluss zu minimieren.

¹⁸ Gemeint ist die der Beginn eines Blocks in dem die Instruktion und die Distraktoren eingeblendet werden. Im Anschluss an die Instruktionsphase folgte die RSVP in der Bildschirmmitte.

9.2.4.2 Verwendung von flackernden Distraktoren

Ein weiterer Weg, um die Habituation des retinalen Abbilds der Distraktoren zu minimieren, ist die Verwendung von flackernden Distraktoren. Ein ähnlicher Ansatz wurde schon erfolgreich in Experimenten zur Messung der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung eingesetzt (McMains & Somers, 2004; Somers et al., 1999). Anstatt die Distraktoren unverändert in der Peripherie darzubieten, kann man sie in regelmäßigen Abständen ein- und ausblenden. Dies führt zu minimierter sensorischer Habituation.

Ein weiterer Effekt der flackernden Distraktoren könnte darin liegen, dass mit der steigenden Salienz der Distraktoren auch deren störender Einfluss auf die Zielerkennung innerhalb der RSVP erhöht wird. Nachdem aufgrund der Befunde der durchgeführten Experimente favorisierten Modell zur Steuerung der Aufmerksamkeit sollte die Unterdrückung der Distraktoren umso stärker ausfallen, je stärker ihr störender Einfluss ist.

Es wird somit erwartet, dass die Verwendung von flackernden Distraktoren in Replikationsstudien zum einen die durch sensorische Habituation bedingte frühe Abnahme der BOLD Signalunterschiede der experimentellen Bedingungen reduziert und zum anderen die zu beobachtende Unterdrückung der Distraktoren erhöht.

9.2.4.3 Wechsel der Kontrollbedingung in den Verhaltensexperimenten

Erst nach Beginn der Messung des Verhaltensexperiments 2a wurde von einigen Probanden geäußert, dass die Reaktion auf das Flackern eines der Distraktoren während der Suche nach einer Unterbrechung innerhalb der RSVP sehr leicht fiel. Dies geschah aufgrund der ungewollten Ähnlichkeit zwischen beiden Aufgaben. Die kurze Unterbrechung innerhalb der RSVP wurde von einigen Probanden als Flackern wahrgenommen. Es herrschte somit eine Ähnlichkeit der Ziele und Proben. Die mittlere Reaktionszeit auf die Unterbrechung der RSVP unterschied sich nicht bedeutend von den Reaktionszeiten für die Ziele X und O. Die Reaktionszeiten auf das Flackern der Proben waren bei der Suche nach der Unterbrechung jedoch deutlich kürzer als bei der Suche nach anderen Zielen.

Die Ähnlichkeit von Zielen und Proben in der Kontrollbedingung wurde jedoch nicht als kritisch betrachtet. Die Schlussfolgerung des Experiments, dass

zielinkompatible Distraktoren stärker durch Aufmerksamkeitsprozesse unterdrückt werden als zielkompatible, wurde nicht in Frage gestellt.

9.2.4.4 Erhöhen der Aufgabenschwierigkeit

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente legen die Hypothese nahe, dass die Hemmung von Distraktoren mit deren störenden Einfluss auf die zu bewältigende Aufgabe wächst.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung verstärkter Unterdrückung von Distraktoren liegt im Erhöhen der Aufgabenschwierigkeit (Lavie, 1995; Lavie & Tsal, 1994). Bei leichten Aufgaben werden Distraktoren weniger ausgeblendet als bei schweren Aufgaben. Das Erhöhen der Aufgabenschwierigkeit sollte somit die in den Experimenten beobachtete selektive Aufmerksamkeitsmodulation verstärken.

Die mittleren Trefferraten auf Ziele und Proben lagen in den Verhaltensexperimenten bei ca. 90 %. Um Deckeneffekte zu vermeiden, wurden die Trefferraten keiner statistischen Analyse unterzogen. Eine Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit hätte sicherlich zu niedrigeren Trefferraten geführt.

Ein einfacher Weg zur Erhöhung der Schwierigkeit der Zielerkennung innerhalb der RSVP liegt in der Verkürzung der Darbietungsdauer der einzelnen Buchstaben. In Folgeexperimenten könnten die Darbietungszeiten drastisch verkürzt werden (Brehaut, Enns, & Di Lollo, 1999; Folk, Leber, & Egeth, 2002).

9.3 Weiterführende Fragestellungen

In den berichteten Experimenten wurde demonstriert, dass die Aufmerksamkeitsverteilung im Sehfeld auch weit jenseits des Aufmerksamkeitsfokus in Abhängigkeit der zu bewältigenden Aufgabe gezielt moduliert wird. Die Aufmerksamkeitsmodulation lässt sich schon in frühen visuellen Kortexarealen nachweisen. Im Folgenden wird beschrieben, wie das verwendete experimentelle Design für weiterführende Studien verwendet werden könnte.

9.3.1 Variation der Komplexität der Aufgabenstellung

Beim Gedanken, dass Aufmerksamkeit außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus aufgabenabhängig moduliert wird, stößt man schnell auf die Frage, wie flexibel sich die Aufmerksamkeitssteuerung an unterschiedliche Bedingungen anpassen kann. Wieviele separate Distraktororte können gleichzeitig gezielt unterdrückt werden? Wenn zwischen zielkompatiblen und zielinkompatiblen Distraktoren unterschieden wird, was geschieht, wenn nach mehreren verschiedenen Zielen innerhalb der RSVP gesucht werden muss?

Zu diesen Fragen lassen sich unter Verwendung der in den Experimenten vorgestellten Untersuchungsmethodik mit geringem Aufwand Experimente konzipieren. Als unabhängige Variablen bieten sich die Anzahl der in der Peripherie dargestellten Distraktororte und die Anzahl der gleichzeitig innerhalb der RSVP zu suchenden Zielreize an.

9.3.2 Variation des Abstands der Distraktoren zum Aufmerksamkeitsfokus

Wenn es sich bei der Distraktorhemmung um einen vorwiegend durch gezielte Aufmerksamkeitssteuerung bedingten Prozess handelt, sollte sich der Abstand der Distraktoren zum beachteten Ort stark auf die Größe des beobachtbaren Effekts auswirken.

Die störende Wirkung von Distraktoren steigt mit deren Nähe zum beachteten Ort (Eriksen & Hoffman, 1973; LaBerge, 1983). Da angenommen wird, dass der Grad der Distraktorhemmung von der Größe des störenden Einflusses des Distraktors abhängt, sollte die Distraktorhemmung mit dem Verringern des Abstands des Distraktors zum Ziel zunehmen.

Die in den berichteten Experimenten verwendeten Abstände der Distraktoren zum Ziel wurden sehr groß gewählt, um die kortikalen Repräsentationen der in der Peripherie befindlichen Orte ohne Überschneidung bestimmen zu können. In reinen Verhaltensstudien könnten viel geringere Abstände verwendet werden. Dies sollte zu deutlich vergrößerter Distraktorhemmung führen. Die Verwendung zielkompatibler und zielinkompatibler Distraktoren könnte dabei zur Replikation der postulierten Inhibitionszone des Spotlights herangezogen werden (Cutzu & Tsotsos, 2003; Müller & Kleinschmidt, 2004).

9.3.3 Zeitliche Dynamik der Distraktorhemmung

Der in dieser Arbeit berichtete Befund, dass Distraktoren während der Suche nach Zielen innerhalb der RSVP unterdrückt werden, erlaubt keine Aussage über die zeitliche Dynamik des Hemmungsprozesses (H. E. Egeth & Yantis, 1997; Serences, Yantis, Culbertson, & Awh, 2004; Woldorff et al., 2002). Es ist denkbar, dass die Aufmerksamkeit während der Darbietung der RSVP unverändert im Sehfeld bestehen bleibt. Es wäre jedoch auch möglich, dass die Aufmerksamkeit bei der Darbietung jedes neuen Buchstabens innerhalb der RSVP neu im Sehfeld verteilt wird.

Durch die blockweise Untersuchung mittels fMRT kann diese Frage aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung nicht beantwortet werden. Mittels eines trialbasierten Designs (Burock, Buckner, Woldorff, Rosen, & Dale, 1998;

Serences, 2004) kann jedoch die genaue zeitliche Dynamik der Aufmerksamkeitsmodulation mittels fMRT ermittelt werden. Zusätzlich bietet sich die kombinierte Messung von ereigniskorrelierten Potentialen und fMRT an. Hierdurch könnte bestimmt werden, ob die Hemmung der Distraktororte schon vor der Darbietung eines zu identifizierenden Stimulus ausgelöst wird, oder ob sie erst nach der Darbietung des zu identifizierenden Reizes beginnt.

9.3.4 Distraktorhemmung bei taktiler Stimulation

Die somatotope Organisation des sensomotorischen Kortex (Bierbaumer & Schmidt, 1991; Pinel, 1997), ermöglicht die genaue Bestimmung der kortikalen Repräsentationen einzelner Körperteile mittels fMRT. Es stellt sich die Frage, ob beim Beobachten taktiler Reize eines Körperteils die neuronale Antwort taktiler Stimulation anderer unbeachteter Körperteile durch Aufmerksamkeit unterdrückt wird.

9.4 Anwendungsfelder

Die in der Dissertation durchgeführten Experimente untersuchten Mechanismen der Aufmerksamkeitssteuerung. Es handelt sich um Grundlagenforschung über die Arbeitsweise des visuellen Systems. Obwohl es nicht die vorherrschende Intention der durchgeführten Studien gewesen ist, kann aus den gewonnenen Erkenntnissen anwendungsorientierter Nutzen gezogen werden. Einige Ideen hierzu werden in diesem Abschnitt grob umrissen. Es ist nicht auszuschließen, dass in einigen der genannten Anwendungsfelder schon Forschung in die vorgeschlagenen Richtungen durchgeführt wurde.

9.4.1 Trainierbarkeit der Distraktorhemmung

Da es sich bei der Aufmerksamkeitssteuerung um einen hochkomplexen Prozess handelt, stellt ihre Erlernbarkeit einen interessanten Forschungsgegenstand da. So konnte gezeigt werden, dass der Erwerb von Expertise beim Autofahren (Rasanen & Summala, 1998) oder bei Videospielen (Risenhuber, 2004) mit einer Veränderung der Leistungsfähigkeit der Aufmerksamkeitssteuerung einhergeht.

Es ist somit naheliegend, dass auch bei der experimentellen Untersuchung der Aufmerksamkeitssteuerung Übungseffekte zu beobachten sind. Interessant wäre hierbei, ob die selektive Aufmerksamkeitssteuerung schon zu Beginn einer neu zu lernenden Aufgabe verwendet wird, oder ob sich kontinuierliche Veränderungen der Aufmerksamkeitsverteilung beobachten lassen. Zeitverlaufsanalysen könnten zu dieser Frage interessante Befunde beisteuern. Bei der Betrachtung der Trainierbarkeit der Aufmerksamkeitssteuerung stellt sich auch die Frage, ob sich im Verlauf eines Experiments Ermüdungseffekte nachweisen lassen und inwiefern diese Ermüdungseffekte mit Leistungseinbußen einhergehen (Lambert & Sumich, 1996; Weaver, Lupianez, & Watson, 1998).

9.4.2 Diagnose und Klassifikation von Aufmerksamkeitsstörungen

Ergebnisse aus der Grundlagenforschung über die Arbeitsweise der Aufmerksamkeitssteuerung können für die Klassifikation von Aufmerksamkeitsstörungen sehr hilfreich sein. Das Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen erlaubt die Zuordnung von Aufmerksamkeitsdefiziten zu den Ursachen der Störung. Eine sich aus der Beobachtung selektiver Unterdrückung störender Reize ergebende Fragestellung ist, ob Symptome von Aufmerksamkeitsstörungen auf die unzureichende Funktion der unterdrückenden Mechanismen rückführbar sind. Interessant wäre hierbei, ob die Einteilung von Aufmerksamkeitsstörungen nach dem Grad der Wirksamkeit des Hervorhebens der beachteten Bereiche und des Unterdrückens der Distraktoren sinnvoll ist (Booth et al., 2005; Plaisted, O'Riordan, & Baron-Cohen, 1998a, 1998b).

9.4.3 Distraktorhemmung und Lesefertigkeit

Ein weiteres lohnendes Forschungsgebiet könnte die Anwendung des Grundlagenwissens über die selektive Unterdrückung der Distraktororte auf Untersuchungen des Leseerwerbs darstellen (Hulslander et al., 2004; Valdois, Bosse, & Tainturier, 2004; Willcutt, Pennington, Olson, Chhabildas, & Hulslander, 2005). Beim Lesen von Textzeilen könnte Distraktorhemmung zur Unterdrückung der störenden benachbarten Textzeilen verwendet werden. Die Ausprägung dieses Mechanismus sollte mit dem Grad der Lesefähigkeit korrelieren. Interessant wäre ein Vergleich von Probanden unterschiedlicher Muttersprache. Bei Sprachen mit horizontaler Schriftweise sollten geübte Leser besonders

effektiv die oberen und unteren Zeilen ausblenden, während bei Sprachen mit vorwiegend senkrechter Schriftweise die Hemmung der linken und rechten Spalten zu beobachten sein sollte.

9.4.4 Distraktorhemmung und Werbepsychologie

Auch in der Werbepsychologie ist das Grundlagenwissen zur visuellen Aufmerksamkeitssteuerung anwendbar (Erk et al., 2003; Erk, Spitzer, Wunderlich, Galley, & Walter, 2002).

Beim Betrachten von Internetseiten könnte die Beachtung von Bannerwerbung stark von deren Inhalten abhängen (Cho, 2003). In Fällen, in denen Betrachter einer Webseite gezielt nach Informationen zu einem Thema suchen, könnte aufgabenirrelevante Bannerwerbung durch visuelle Aufmerksamkeit gezielt unterdrückt werden. Der Grad der Unterdrückung könnte hierbei von der Salienz der Bannerwerbung abhängen. Es könnte der paradoxe Effekt auftreten, dass die Werbewirkung der Banner umso geringer ausfällt, je auffälliger sie gestaltet sind.

Mittels fMRT kann der Grad der Aufmerksamkeitszuwendung auf Bannerwerbung in Abhängigkeit des Inhalts der Webseite gemessen werden. Dies könnte eine sinnvolle Erweiterung der ansonsten vorherrschenden Betrachtung der Augenbewegungen der Probanden sein (Rayner, Rotello, Stewart, Keir, & Duffy, 2001). Mittels fMRT kann der zu einer Bannerwerbung passende Inhalt einer Webseite bestimmt werden. Es kann jedoch auch das optimale Design einer Bannerwerbung für eine vorhandene Webseite bestimmt werden.

9.5 Schlusswort

Im Alltagsleben muss das visuelle System unter unterschiedlichen Bedingungen effektiv die für das Verhalten relevante Information verarbeiten. Hierbei muss die Verarbeitung von Stimuli unterschiedlicher Anzahl und Größe möglich sein. Visuelle Aufmerksamkeit unterstützt bei der Trennung der relevanten von irrelevanten Informationen und hilft somit dabei, die zu verarbeitende Informationsmenge herabzusetzen.

Ein Aufmerksamkeitssystem, das ausschließlich einen Ort im Sehfeld hervorheben kann und dabei von einer unflexiblen Inhibitionszone umschlossen ist, erscheint vor dem Hintergrund der immensen Anforderungen durch die zu bewältigenden Aufgaben wenig effektiv. Ein Mechanismus, der relevante Information hervorheben und störende Information unterdrücken kann, scheint den Anforderungen des Alltags besser gerecht zu werden.

Die Ergebnisse dieser Studie liefern einen Beitrag um die Funktionsweise des visuellen Aufmerksamkeitssystems besser verstehen zu können.

10 Literatur

- Anderson, J. R. (1995). *Kognitive Psychologie* (J. Grabowski & R. Graf, Trans. 2 ed.). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Ansorge, U. (2003). Influences of response-activating stimuli and passage of time on the Simon effect. *Psychol Res*, 67(3), 174-183.
- Ansorge, U., & Wühr, P. (2004). A response-discrimination account of the Simon effect. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 30(2), 365-377.
- Atkinson, R. L., Atkinson, R. C., Smith, E. E., Bem, D. J., & Nolen-Hoeksema, S. (1996). *Hilgard's Introduction to Psychology* (12 ed.). Fort Worth: Harcourt Brace College Publishers.
- Avidan, G., Harel, M., Hendler, T., Ben-Bashat, D., Zohary, E., & Malach, R. (2002). Contrast sensitivity in human visual areas and its relationship to object recognition. *J Neurophysiol*, 87(6), 3102-3116.
- Beringer, J. (1993). *ERTS Experimentelles Run Time System Version 3.00 Referenz Anwendersprache*. Frankfurt: Berisoft.
- Bichot, N. P., Cave, K. R., & Pashler, H. (1999). Visual selection mediated by location: feature-based selection of noncontiguous locations. *Percept Psychophys*, 61(3), 403-423.
- Bierbaumer, N., & Schmidt, R. (1991). *Biologische Psychologie*. Heidelberg: Springer.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Lei, Z., Trommer, B. L., Davenport, N. D., et al. (2005). Larger deficits in brain networks for response inhibition than for visual selective attention in attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *J Child Psychol Psychiatry*, 46(1), 94-111.
- Brefczynski, J. A., & DeYoe, E. A. (1999). A physiological correlate of the 'spotlight' of visual attention. *Nat Neurosci*, 2(4), 370-374.
- Brehaut, J. C., Enns, J. T., & Di Lollo, V. (1999). Visual masking plays two roles in the attentional blink. *Percept Psychophys*, 61(7), 1436-1448.
- Burock, M. A., Buckner, R. L., Woldorff, M. G., Rosen, B. R., & Dale, A. M. (1998). Randomized event-related experimental designs allow for extremely rapid presentation rates using functional MRI. *Neuroreport*, 9(16), 3735-3739.
- Caputo, G., & Guerra, S. (1998). Attentional selection by distractor suppression. *Vision Res*, 38(5), 669-689.
- Castiello, U., & Umiltà, C. (1990). Size of the attentional focus and efficiency of processing. *Acta Psychol (Amst)*, 73(3), 195-209.
- Cave, K. R., & Bichot, N. P. (1999). Visuospatial attention: beyond a spotlight model. *Psychon Bull Rev*, 6(2), 204-223.
- Cepeda, N. J., Cave, K. R., Bichot, N. P., & Kim, M. S. (1998). Spatial selection via feature-driven inhibition of distractor locations. *Percept Psychophys*, 60(5), 727-746.
- Cho, C. H. (2003). Factors influencing clicking of banner ads on the WWW. *Cyberpsychol Behav*, 6(2), 201-215.
- Clark, V. P., & Hollyard, S. A. (1996). Spatial selective attention affects early extrastriate but not striate components of the visual evoked potential. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8, 387-402.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nat Rev Neurosci*, 3(3), 201-215.
- Cutzu, F., & Tsotsos, J. K. (2003). The selective tuning model of attention: psychophysical evidence for a suppressive annulus around an attended item. *Vision Res*, 43(2), 205-219.
- Dale, A. M., Fischl, B., & Sereno, M. I. (1999). Cortical surface-based analysis. I. Segmentation and surface reconstruction. *Neuroimage*, 9(2), 179-194.

- Downing, P. E., & Pinker, S. (1985). The spatial structure of visual attention. In M. I. Posner & O. S. M. Martin (Eds.), *Attention and performance XI: Mechanisms of attention* (pp. 171-187). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Egeth, H. (1977). Attention and Preparation. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 11, pp. 277-320). New York: Academic Press.
- Egeth, H. E., & Yantis, S. (1997). Visual attention: control, representation, and time course. *Annu Rev Psychol*, 48, 269-297.
- Engel, S. A., Glover, G. H., & Wandell, B. A. (1997). Retinotopic organization in human visual cortex and the spatial precision of functional MRI. *Cereb Cortex*, 7(2), 181-192.
- Eriksen, C. W., & Hoffman, J. E. (1973). The extent of processing of noise elements during selective coding from visual displays. *Percept Psychophys*, 12, 155-160.
- Eriksen, C. W., & Hoffman, J. E. (1974). Selective attention: Noise suppression or signal enhancement? *Bulletin of the Psychonomic Society*, 4, 587-589.
- Eriksen, C. W., & St James, J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: a zoom lens model. *Percept Psychophys*, 40(4), 225-240.
- Eriksen, C. W., & Yeh, Y. Y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 11(5), 583-597.
- Erk, S., Kiefer, M., Grothe, J., Wunderlich, A. P., Spitzer, M., & Walter, H. (2003). Emotional context modulates subsequent memory effect. *Neuroimage*, 18(2), 439-447.
- Erk, S., Spitzer, M., Wunderlich, A. P., Galley, L., & Walter, H. (2002). Cultural objects modulate reward circuitry. *Neuroreport*, 13(18), 2499-2503.
- Facoetti, A. (2001). Facilitation and inhibition mechanisms of human visuospatial attention in a non-search task. *Neurosci Lett*, 298(1), 45-48.
- Facoetti, A., & Molteni, M. (2000). Is attentional focusing an inhibitory process at distractor location? *Brain Res Cogn Brain Res*, 10(1-2), 185-188.
- Feychting, M. (2005). Health effects of static magnetic fields--a review of the epidemiological evidence. *Prog Biophys Mol Biol*, 87(2-3), 241-246.
- Fischl, B., Sereno, M. I., & Dale, A. M. (1999). Cortical surface-based analysis. II: Inflation, flattening, and a surface-based coordinate system. *Neuroimage*, 9(2), 195-207.
- Flowers, J. H., & Wilcox, N. (1982). The effect of flanking context on visual classification: The joint contribution of interactions at different processing levels. *Perception & Psychophysics*, 32(6), 581-591.
- Folk, C. L., Leber, A. B., & Egeth, H. E. (2002). Made you blink! Contingent attentional capture produces a spatial blink. *Percept Psychophys*, 64(5), 741-753.
- Goldstein, E. B. (1996). *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum, akademischer Verlag.
- Grill-Spector, K., & Malach, R. (2004). The Human Visual Cortex. *Annual Reviews Neuroscience*, 27, 649-677.
- Heinze, H. J., Mangun, G. R., Burchert, W., Hinrichs, H., Scholz, M., Munte, T. F., et al. (1994). Combined spatial and temporal imaging of brain activity during visual selective attention in humans. *Nature*, 372(6506), 543-546.
- Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95(3), 781-787.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex. *J Physiol*, 148, 574-591.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *J Physiol*, 195(1), 215-243.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1969). Anatomical demonstration of columns in the monkey striate cortex. *Nature*, 221(182), 747-750.
- Huk, A. C., Dougherty, R. F., & Heeger, D. J. (2002). Retinotopy and functional subdivision of human areas MT and MST. *J Neurosci*, 22(16), 7195-7205.

- Hulslander, J., Talcott, J., Witton, C., DeFries, J., Pennington, B., Wadsworth, S., et al. (2004). Sensory processing, reading, IQ, and attention. *J Exp Child Psychol*, 88(3), 274-295.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York: Holt.
- Kanwisher, N., & Wojciulik, E. (2000). Visual attention: insights from brain imaging. *Nat Rev Neurosci*, 1(2), 91-100.
- Kastner, S., De Weerd, P., Pinsk, M. A., Elizondo, M. I., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (2001). Modulation of sensory suppression: implications for receptive field sizes in the human visual cortex. *J Neurophysiol*, 86(3), 1398-1411.
- Kastner, S., Pinsk, M. A., De Weerd, P., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (1999). Increased activity in human visual cortex during directed attention in the absence of visual stimulation. *Neuron*, 22(4), 751-761.
- Klein, R. (1988). Inhibitory tagging system facilitates visual search. *Nature*, 334(6181), 430-431.
- Köchli, V. D., & Marineck, B. (1998). *Wie funktioniert MRI?: Eine Einführung in die Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung*. Heidelberg: Springer.
- LaBerge, D. (1983). Spatial extent of attention to letters and words. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 371-379.
- Lambert, A., & Sumich, A. L. (1996). Spatial orienting controlled without awareness: a semantically based implicit learning effect. *Q J Exp Psychol A*, 49(2), 490-518.
- Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 21(3), 451-468.
- Lavie, N., & Tsal, Y. (1994). Perceptual load as a major determinant of the locus of selection in visual attention. *Percept Psychophys*, 56(2), 183-197.
- Leszczynski, D. (2005). Rapporteur report: cellular, animal and epidemiological studies of the effects of static magnetic fields relevant to human health. *Prog Biophys Mol Biol*, 87(2-3), 247-253.
- Logothetis, N. K. (2003). The underpinnings of the BOLD functional magnetic resonance imaging signal. *J Neurosci*, 23(10), 3963-3971.
- McMains, S. A., & Somers, D. C. (2004). Multiple spotlights of attentional selection in human visual cortex. *Neuron*, 42(4), 677-686.
- Mesulam, M. M. (1981). A cortical network for directed attention and unilateral neglect. *Ann Neurol*, 10(4), 309-325.
- Mounts, J. R. (2000). Evidence for suppressive mechanisms in attentional selection: feature singletons produce inhibitory surrounds. *Percept Psychophys*, 62(5), 969-983.
- Müller, N. G., Bartelt, O. A., Donner, T. H., Villringer, A., & Brandt, S. A. (2003). A physiological correlate of the "Zoom Lens" of visual attention. *J Neurosci*, 23(9), 3561-3565.
- Müller, N. G., & Kleinschmidt, A. (2004). The attentional 'spotlight's' penumbra: center-surround modulation in striate cortex. *Neuroreport*, 15(6), 977-980.
- Müller, N. G., Mollenhauer, M., Rösler, A., & Kleinschmidt, A. (2005). The attentional field has a Mexican hat distribution. *Vision Res*, 45(9), 1129-1137.
- Neil, W. T. (1977). Inhibitory and Facilitatory Processes in Selective Attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 3(3), 444-450.
- O'Craven, K. M., Downing, P. E., & Kanwisher, N. (1999). fMRI evidence for objects as the units of attentional selection. *Nature*, 401(6753), 584-587.
- Olman, C., Ronen, I., Ugurbil, K., & Kim, D. S. (2003). Retinotopic mapping in cat visual cortex using high-field functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci Methods*, 131(1-2), 161-170.
- Parasuraman, R. (2000). *The Attentive Brain*: MIT Press.
- Pashler, H. (1998). *Attention*. San Diego: Psychology Press.
- Pinel, P. J. (1997). *Biopsychologie* (E. Hert, Trans.). Heidelberg: Springer.
- Plaisted, K., O'Riordan, M., & Baron-Cohen, S. (1998a). Enhanced discrimination of novel, highly similar stimuli by adults with autism during a perceptual learning task. *J Child Psychol Psychiatry*, 39(5), 765-775.

- Plaisted, K., O'Riordan, M., & Baron-Cohen, S. (1998b). Enhanced visual search for a conjunctive target in autism: a research note. *J Child Psychol Psychiatry*, 39(5), 777-783.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Q J Exp Psychol*, 32(1), 3-25.
- Posner, M. I., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In H. Bouma & G. G. Bouwhuis (Eds.), *Attention and performance* (Vol. X, pp. 531-556). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci*, 13, 25-42.
- Posner, M. I., Snyder, C. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *J Exp Psychol*, 109(2), 160-174.
- Rasanen, M., & Summala, H. (1998). Attention and expectation problems in bicycle-car collisions: an in-depth study. *Accid Anal Prev*, 30(5), 657-666.
- Rayner, K., Rotello, C. M., Stewart, A. J., Keir, J., & Duffy, S. A. (2001). Integrating text and pictorial information: eye movements when looking at print advertisements. *J Exp Psychol Appl*, 7(3), 219-226.
- Reber, A. S. (1989). Implicit Learning and Tacit Knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118(3), 219-235.
- Remington, R., & Pierce, L. (1984). Moving attention: Evidence for time-invariant shifts of visual selective attention. *Perception & Psychophysics*, 35, 393-399.
- Ress, D., & Heeger, D. J. (2003). Neuronal correlates of perception in early visual cortex. *Nat Neurosci*, 6(4), 414-420.
- Risenhuber, M. (2004). An action video game modifies visual processing. *Trends Neurosci*, 27(2), 72-74.
- Serences, J. T. (2004). A comparison of methods for characterizing the event-related BOLD timeseries in rapid fMRI. *Neuroimage*, 21(4), 1690-1700.
- Serences, J. T., Yantis, S., Culberson, A., & Awh, E. (2004). Preparatory activity in visual cortex indexes distractor suppression during covert spatial orienting. *J Neurophysiol*, 92(6), 3538-3545.
- Sereno, M. I., Dale, A. M., Reppas, J. B., Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Brady, T. J., et al. (1995). Borders of multiple visual areas in humans revealed by functional magnetic resonance imaging. *Science*, 268(5212), 889-893.
- Shaw, M. L., & Shaw, P. (1977). Optimal allocation of cognitive resources to spatial locations. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 3(2), 201-211.
- Shulman, G. L., Remington, R. W., & McLean, J. P. (1979). Moving attention through physical space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 5, 522-526.
- Siemens. (2003). *Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie*. Erlangen: Siemens Medical.
- Slotnick, S. D., Klein, S. A., Carney, T., & Sutter, E. E. (2001). Electrophysiological estimate of human cortical magnification. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1349-1356.
- Smith, A. T., Singh, K. D., & Greenlee, M. W. (2000). Attentional suppression of activity in the human visual cortex. *Neuroreport*, 11(2), 271-277.
- Somers, D. C., Dale, A. M., Seiffert, A. E., & Tootell, R. B. (1999). Functional MRI reveals spatially specific attentional modulation in human primary visual cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 96(4), 1663-1668.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. Stuttgart: Thieme.
- Tipper, S. P., & Weaver, B. (1994). Behavioural Goals Determine Inhibitory Mechanisms of Selective Attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47A(4), 809-840.
- Tootell, R. B., Hadjikhani, N., Hall, E. K., Marrett, S., Vanduffel, W., Vaughan, J. T., et al. (1998). The retinotopy of visual spatial attention. *Neuron*, 21(6), 1409-1422.

- Tootell, R. B., Mendola, J. D., Hadjikhani, N. K., Ledden, P. J., Liu, A. K., Reppas, J. B., et al. (1997). Functional analysis of V3A and related areas in human visual cortex. *J Neurosci*, 17(18), 7060-7078.
- Toronov, V., Walker, S., Gupta, R., Choi, J. H., Gratton, E., Hueber, D., et al. (2003). The roles of changes in deoxyhemoglobin concentration and regional cerebral blood volume in the fMRI BOLD signal. *Neuroimage*, 19(4), 1521-1531.
- Toronov, V., Webb, A., Choi, J. H., Wolf, M., Michalos, A., Gratton, E., et al. (2001). Investigation of human brain hemodynamics by simultaneous near-infrared spectroscopy and functional magnetic resonance imaging. *Med Phys*, 28(4), 521-527.
- Tsal, Y. (1983). Movements of attention across the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 9, 523-530.
- Turner, R., Howseman, A., Rees, G. E., Josephs, O., & Friston, K. (1998). Functional magnetic resonance imaging of the human brain: data acquisition and analysis. *Experimental Brain Research*, 123, 5-12.
- Valdois, S., Bosse, M. L., & Tainturier, M. J. (2004). The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia: review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia*, 10(4), 339-363.
- Warnking, J., Dojat, M., Guerin-Dugue, A., Delon-Martin, C., Olympieff, S., Richard, N., et al. (2002). fMRI retinotopic mapping--step by step. *Neuroimage*, 17(4), 1665-1683.
- Weaver, B., Lupianez, J., & Watson, F. L. (1998). The effects of practice on object-based, location-based, and static-display inhibition of return. *Percept Psychophys*, 60(6), 993-1003.
- Willcutt, E. G., Pennington, B. F., Olson, R. K., Chhabildas, N., & Hulslander, J. (2005). Neuropsychological analyses of comorbidity between reading disability and attention deficit hyperactivity disorder: in search of the common deficit. *Dev Neuropsychol*, 27(1), 35-78.
- Woldorff, M. G., Liotti, M., Seabolt, M., Busse, L., Lancaster, J. L., & Fox, P. T. (2002). The temporal dynamics of the effects in occipital cortex of visual-spatial selective attention. *Brain Res Cogn Brain Res*, 15(1), 1-15.
- Zeki, S., Watson, J. D., Lueck, C. J., Friston, K. J., Kennard, C., & Frackowiak, R. S. (1991). A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex. *J Neurosci*, 11(3), 641-649.

11 Anhang

11.1 Abkürzungsverzeichnis

AC	anteriore Kommissur
BIC	Brain Imaging Center
BOLD	blood oxygenation level dependent
COR	coronar
EPI	echoplanar imaging / echoplanare Bildgebung
fMRI	functional magnetic resonance imaging / funktionelle Magnetresonanztomographie
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
MR-Signal	Magnetresonanzsignal
MRT	Magnetresonanztomograph oder Magnetresonanztomographie
NIRS	near infrared spectroscopy
PC	posteriore Kommissur
RSVP	rapid serial visual presentation
RT	reactiontime / Reaktionszeit
SAG	sagittal
SOA	Stimulus onset asynchrony
TE	gängige Abkürzung für Echozeit
TR	gängige Abkürzung für Repetitionszeit
TRA	transversal

11.2 Akademischer Lebenslauf

Schulbildung

1983-1987	Tannenbergschule in Seeheim
1987-1996	Gymnasium am Schuldorf Bergstraße in Seeheim
17.06.1996	Abitur

Hochschulbildung

1997-2000	Technische Universität Darmstadt: Diplomstudiengang Psychologie
05.10.2000- 21.03.2001	Aichi Center for Japanese Studies in Okazaki / Japan: Japanisch Intensivkurs
01.10.2001- 15.04.2003	Technische Universität Darmstadt: Diplomstudiengang Psychologie
01.05.2001- 01.08.2001	Studienarbeit: „Beschreibung einer graphischen Entwicklungsumgebung zur Programmierung psychologischer Experimente mit ERTS“
25.06.2002 23.12.2002	- Diplomarbeit: „Erklärung des abrufbasierten Vergessens mithilfe der Rechnersimulation eines Exemplarmodells“
01.05.2003- 23.04.2005	Wissenschaftlicher Angestellter im Brain Imaging Center des Klinikums der Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt/Main

11.3 Abstract

Four experiments were conducted in order to investigate the distribution of visual spatial attention outside the spotlight of attention. The main questions concerned whether peripheral distracters are suppressed during the identification of target characters within a rapid serial visual presentation (RSVP) and whether attention is differentially distributed on target-compatible and target-incompatible distracters. To answer the questions behavioural data was collected using probe presentations while the BOLD signal in the corresponding visual cortex was recorded via fMRI. The results indicate that peripheral distracter locations are suppressed during the identification of characters within the RSVP. Target-incompatible distracters are stronger suppressed than target-compatible distracters.

The results are in line with studies reporting that in addition to the enhancement of activation within the spotlight of attention there is also a taskdependent modulation of attention outside of it.

11.4 Erklärung über die selbständige Verfassung der Dissertation

Hier mit erkläre ich, dass ich diese Arbeit – abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen – selbständig verfasst habe.

Daniel Ebeling
Alsbach 12.04.2005